

Reaprovechamiento de las baterías Recargables utilizadas en los vehículos eléctricos de la ciudad de Bogotá basado en el enfoque de análisis del ciclo de Vida

Nataly Stefanny Ramírez Arévalo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Pecuarias y de Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

Bogotá

2022

Reaprovechamiento de las baterías recargables utilizadas en los vehículos eléctricos de la ciudad de Bogotá basado en un enfoque de análisis del ciclo de vida

Nataly Stefanny Ramírez Arévalo

Proyecto de Investigación como requisito para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director (a):

MSc Luis Alejandro Duarte

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Pecuarias y de Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

Bogotá

2022

Nota de aceptación

Director del trabajo de grado

Jurado evaluador

Jurado

Dedicatoria

A Dios por haberme dado la oportunidad de vivir, de poder estar en este planeta donde he compartido con seres maravillosos, por ser mi padre, amigo, confidente y mi principal apoyo en las circunstancias más difíciles, por las cuales he cruzado.

A mi familia por brindarme apoyo incondicional y ser eje motivador, sin el cual no hubiese llegado a esta etapa de mi vida, donde logre llevar acabo esta investigación, con la cuál espero haber aportado algo a la ciudadanía.

A mis amigos más allegados por contribuir a mi crecimiento personal, por comprenderme, por apoyarme con su conocimiento y experiencia durante mi proceso formativo.

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecerle a Dios por ser mi fortaleza en tiempos difíciles, por ser guía en momentos decisivos, por darme voluntad para seguir y ante todo por haberme brindado la posibilidad de poder llegar a obtener mi título profesional. Quiero agradecer a la vida por haberme ofrecido tanto aprendizaje y crecimiento personal durante esta etapa que estoy culminando y a la vez iniciando con mi proyecto de investigación.

Agradezco también a la Universidad nacional Abierta y a Distancia por permitirme ser parte de ella, estudiando mi carrera y a la vez a todos los docentes que la conforman, por brindarme su conocimiento y apoyo durante todo este tiempo.

Resumen

El trabajo es el resultado de una investigación de tipo comparativa exploratoria del análisis de las diferentes etapas que componen el ciclo de vida y el reaprovechamiento de las baterías recargables, utilizadas en vehículos eléctricos en la ciudad de Bogotá; Para esto se consultaron y se compararon diferentes fuentes de información para conocer y ahondar en el tema.

Por tanto, el estudio muestra los diferentes tipos de tecnologías que hoy existen de baterías recargables, entre ellas, la batería ion litio, la cual es la más utilizada hoy en día por su alta capacidad para almacenar energía tanto en dispositivos electrónicos como en vehículos eléctricos. A la vez se da a conocer que es el ciclo de vida de un producto y se consolida un análisis del ciclo de vida para las baterías Ion litio utilizadas en vehículos eléctricos, donde se plasman los principales impactos generados en las diferentes etapas; De la cuna a la tumba.

Se extrae de la información consultada la legislación, programas y planes de manejo que se están llevando a cabo en países pioneros en vehículos eléctricos, de allí el papel que juegan los fabricantes y comerciantes, al igual que los deberes y responsabilidades que adquieren las personas, tanto naturales como jurídicas. Después se realiza el mismo proceso a nivel Colombia, hasta llegar a nivel Distrito, donde se conocen las principales leyes y programas posconsumo que se manejan para los residuos eléctricos y electrónicos RAEE, entre los cuales se clasifican las pilas y baterías.

A partir de la revisión y análisis comparativo entre la información recolectada, se evidencia posibles carencias en la etapa de reciclaje y reaprovechamiento de este tipo de residuos en la ciudad de Bogotá, debido a que la inserción de vehículos eléctricos es relativamente reciente; sin embargo, se resalta la variedad de programas y planes para el manejo de los

residuos RAEE, la manera entre que se interconectan entre ellos, el conocimiento de la toxicidad y peligrosidad de algunos de los componentes de las baterías que circulan comercialmente hoy en día y que ya están siendo desechadas, como las baterías ion litio provenientes de celulares, computadores y las baterías de ácido plomo provenientes de vehículos.

Basándonos en los modelos de gestión y manejo de residuos hallados y teniendo en cuenta la problemática socio ambiental de la ciudad, se diseña la propuesta preliminar de gestión de residuos provenientes de las baterías recargables, al finalizar su primera vida útil en los vehículos eléctricos, con el fin de evitar la contaminación y el deterioro de los recursos ambientales.

Concluyendo que es una propuesta viable y acorde a lo que se viene trabajando en la ciudad, permitiendo bajar la cantidad de desechos generados de este tipo de residuos y la explotación de nuevas materias primas, ya que gran parte de los componentes serán incorporados nuevamente a la cadena productiva.

Palabras claves: Baterías ion lito, Vehículos eléctricos, Ciclo de vida.

Abstract

The work is the result of an exploratory comparative investigation of the analysis of the different stages that make up the life cycle and the reuse of rechargeable batteries used in electric vehicles in the city of Bogotá. For this, different sources of information were consulted and compared to know and delve into the subject

The study shows the different types of rechargeable battery technologies that exist today, including the lithium ion battery, which are the most used today in both electronic devices and electric vehicles due to their high capacity to store energy, while reveals what the life cycle of a product is and consolidates an analysis of the life cycle for lithium ion batteries used in electric vehicles, where the main impacts generated in the different stages are reflected, from the cradle to the grave.

The legislation, programs and management plans that are being carried out in pioneering countries in electric vehicles are extracted from the information consulted, hence the role played by manufacturers and dealers as well as the duties and responsibilities that natural persons acquire. as legal. Afterwards, the same process is carried out at the Colombian level until reaching the District level, where the main laws and post-consumer programs that are managed for RAE electrical and electronic waste are known, among which batteries are classified.

The review and comparative analysis between the information collected, possible shortcomings are evident in the recycling and reuse stage of this type of waste in the city due to the fact that the insertion of electric vehicles is relatively recent, although the variety of programs and plans is highlighted. that are interconnected with each other for the management of RAE waste, of the knowledge of the toxicity and danger of some of the components of the batteries

that circulate commercially today and that are already being discarded such as lithium ion batteries from cell phones, computers and lead acid batteries from vehicles

Based on the management and waste management models found and taking into account the socio-environmental problems of the city, the preliminary proposal for waste management from rechargeable batteries at the end of their first useful life in electric vehicles is designed in order to prevent pollution and deterioration of environmental resources. Concluding that it is a viable proposal and in accordance with what is being worked on in the city, allowing to reduce the amount of waste generated from this type of waste and the exploitation of new raw materials due to the fact that a large part of the components will be incorporated into the chain. productive

Keywords: Lithium ion batteries, Electric vehicles, Life cycle.

Tabla de Contenido

Lista de Tablas	12
Lista de Figuras	13
Lista de Símbolos y Abreviaturas	15
Introducción	17
Estado del Arte de la Investigación	20
Planteamiento del Problema.....	26
Objetivos	28
Justificación	29
Capítulo 1 Tecnologías de las Baterías Recargables para Vehículos Eléctricos	30
Baterías Ion Litio	30
Baterías Plomo y Acido.....	38
Baterías Níquel – Cadmio	41
Capítulo 2 Generalidades del Ciclo de Vida.....	44
¿Qué es el Análisis de Ciclo de Vida?	44
Objetivo y Alcance	45
Inventario del Ciclo de Vida	45
Evaluación del Impacto	46
Análisis del Ciclo de Vida de las Baterías Ion Litio	46
Análisis del Inventario.....	50
Fabricación de baterías	56
Impacto Ambiental.....	65
Capítulo 3 Procesos de Reciclaje y Reutilización de Componentes	70
Reciclaje	71
Formas de Reciclaje	71
Segundo Uso Para las Baterías	83
Capítulo 4 Planes de Manejo y Gestión de Residuos Sólidos de Baterías Recargables Vehiculares de Ion Litio	86
Legislación y Planes de Gestión o de Manejo en Países Pioneros	86
Legislación y Planes de Manejo o de Gestión en la Ciudad de Bogotá.....	100
Capítulo 5 Diseño Preliminar de un Plan de Gestión para Residuos de Baterías Ion Litio de Carros Eléctricos en Bogotá.....	106

Objetivo	106
Objetivos Específicos	106
Política Ambiental	106
Ubicación de Ejecución del Plan	107
Cantidad y Tipo de Materiales que Componen el Residuo al Finalizar el 2030	108
Problemática Socio Ambiental Asociada al Manejo de Este Tipo de Residuos	108
Estrategias.....	110
Desarrollo del Plan.....	110
Componente 1. Creación de la empresa y del programa	110
Componente 2. Manejo y tratamiento de residuos de baterías Ion litio	112
Componente 3. Normatividad y permisos ambientales	115
Componente 4. Monitoreo y seguimiento.....	118
Conclusiones	122
Recomendaciones	124
Bibliografía	125

Lista de Tablas

Tabla 1. Electrodo positivo de alto potencial de baterías ion- Li.

Tabla 2. Electrodo negativo de bajo potencial de baterías ion -Li.

Tabla 3 ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje.

Tabla 4 Empresas involucradas en la cadena de valor de litio.

Tabla 5 Legislación relacionada con los desechos de baterías en China.

Tabla 6 Ventas de vehículos eléctricos por marca.

Tabla 7 Presupuesto.

Tabla 8 Ficha seguimiento y control - aguas residuales.

Tabla 9 Ficha Emisiones atmosféricas y ruido.

Tabla 10 Ficha seguimiento y control - Manejo y disposición de residuo sólidos.

Lista de Figuras

Figura 1 Batería de Whittingham.

Figura 2 Batería de John Goodenough.

Figura 3 Batería de Akira Yoshino.

Figura 4 Fase de descarga de una batería.

Figura 5. Celda de una batería de ion litio.

Figura 6. Evolución de la energía específica, densidad de energía y costos de las celdas de iones de litio entre 1991 y 2005.

Figura 7. Funcionamiento de un batería de Acido – plomo.

Figura 8. Partes de una batería de Níquel- Cadmio.

Figura 9. Fases interactivas de un ACV según la ISO 14040.

Figura 10. Primera vida de una batería.

Figura 11. Segunda vida de una batería.

Figura 12 Método de tajo largo.

Figura 13. Cámaras y pilares.

Figura 14. Litio el oro blanco, yacimientos y explotaciones.

Figura 15. Catalizador anódico de óxidos metales de transición para la extracción de litio del agua de mar.

Figura 16. Generación de grafito.

Figura 17. Montaje de celdas.

Figura 18. Potencia de calentamiento global según el tipo de energía en la fabricación de la batería.

Figura 19. Impactos de la cuna a la puerta por categoría.

Figura 20. Pretratamiento.

Figura 21. Reducción de tostado.

Figura 22. proceso hidrometalúrgico.

Figura 23 Método de flotación.

Figura 24 Reciclaje directo.

Figura 25. Implementación de sistemas de acumulación a nivel global.

Figura 26. mapa de Bogotá.

Figura 27. Puntos de disposición para baterías.

Lista de Símbolos y Abreviaturas

- (ACV) Análisis del ciclo de vida
- (ANDI) Asociación de nacional de empresarios de Colombia
- (ANLA) Autoridad nacional de licencias ambientales
- (BEV) Vehículo eléctrico de batería
- (CAR) Corporación autónoma regional de Cundinamarca
- (DAA) Diagnostico ambiental.
- (DADEP) Departamento administrativo de la defensoría del espacio público.
- (DANE) Departamento administrativo nacional de estadística.
- (EDTA) etilendiaminotetraacético.
- (EIA) Estudio de impacto ambiental.
- (EV) Vehículo eléctrico.
- (FDP) potencial de agotamiento fósil.
- (FEP) potencial de eutrofización de agua dulce.
- (FETP) potencial de toxicidad en agua dulce.
- (GWP) calentamiento global.
- (HTP) potencial de toxicidad humana.
- (LAGP) Membrana electrolítica de estado sólido.
- (LIB) Baterías ion Litio.
- (MDP) potencial de agotamiento de metales.
- (MEP) potencial de eutrofización marina.
- (SEI) Interfase de electrolito sólido.

- (SITP) Sistema integrado de transporte público de Bogotá.
- (ODP) potencial de agotamiento del ozono.
- (OPEP) Organización de países exportadores de petróleo.
- (TB) punto de ebullición.
- (TM) Punto de fusión
- (PGA) Plan de gestión ambiental
- (PHEV) Vehículo híbrido eléctrico enchufable
- (PMFP) potencial de formación de partículas
- (POFP) potencial de formación de fotooxidación
- (PVC) cloruro de polivinilo.
- (PVDF) Fluoruro de polivinilideno.
- (RAEE) Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- (RDC) Republica dominicana del Congo.
- (ReLIB) Reciclaje de baterías Ion litio.
- (REP) Responsabilidad extendida posconsumo.
- (RUNT) Registro único nacional de tránsito.
- (TAP) acidificación terrestre.
- (TB) Punto De ebullición.
- (UAESP) Unidad administrativa especial de servicios públicos.
- (UPS) Sistema de alimentación interrumpida.

Introducción

En el presente proyecto se investiga y se analiza las diferentes etapas que conforman el ciclo de vida de las baterías Ion litio, protagonistas de la transición energética del sector transporte a nivel mundial. Enfocándose en la etapa de reutilización y reciclaje de los residuos al finalizar su vida útil, para dejar un plan preliminar de gestión para los residuos de baterías Ion litio, provenientes de los vehículos eléctricos que circulan en la ciudad de Bogotá.

Para conseguirlo, se plantean diferentes objetivos centralizados en el estudio detallado al análisis del ciclo de vida de las baterías recargables de ion litio usadas en vehículos eléctricos de la ciudad de Bogotá, posibles impactos ambientales asociados a la culminación de su vida útil en los vehículos eléctricos y diseño de una propuesta de reciclado y reutilización de algunos de sus componentes.

Durante la investigación se consultan diferentes fuentes de información primaria provenientes de bases datos, libros, artículos, paginas privadas y públicas; los cuales tratan de los tipos de tecnologías que existen actualmente de baterías recargables, también, investigaciones sobre análisis de las diferentes etapas involucradas en el ciclo de primera vida (fabricación y uso en vehículos) y segunda vida (reutilización y reciclado) de las baterías recargables, para conocer los insumos y la oferta disponible a nivel mundial y los impactos generados durante los procesos implicados. Coincidiendo que donde más se genera emisiones es por la procedencia de la energía utilizada, que por lo general es de carbón o petróleo.

Se indaga sobre el comportamiento y/o crecimiento que ha tenido el mercado de vehículos provenientes de tecnologías más limpias, encontrando que la inserción de este tipo carros en Colombia y en especial en la ciudad de Bogotá aumentado en los últimos años, a corte

de septiembre de 2021 había 5.534 vehículos registrados en la ciudad entre HEV, EV y PHEV, ya para el mismo mes del año 2022 circulaban 9.801 vehículos entre carros, camionetas y buses. Se cree que 172 buses eléctricos equivalen a haber sembrado 148.000 árboles en Bogotá para capturar CO₂. De esta magnitud es el impacto que tiene la inserción de vehículos que provienen de tecnologías diferentes a las convencionales.

Se consulta como se están tratando y disponiendo este tipo de residuos, en países pioneros, también sobre la legislación y planes de manejo de residuos eléctricos – electrónicos vigentes en Colombia. Para así en base a estas iniciativas y planes diseñar el plan preliminar de gestión de este tipo de residuos para la ciudad de Bogotá

En Colombia se evidencia que el tema de baterías Ion litio, usadas en vehículos eléctricos es relativamente nuevo, por tal motivo no se encuentran planes de manejo para este tipo de residuos; existen leyes como: la ley 1672 de 2013, por las cuales se indican los parámetros de la política pública de gestión de residuos de Aparatos eléctricos y electrónicos RAEE generados en el territorio Nacional, teniendo como alcance a todas las personas naturales, jurídicas, que importen, fabriquen, comercialicen, consuman y gestionen sus residuos, en paralelo, Decretos-Ley como es el caso del Decreto 2811 de 2974, por el cual se podrá imponer a quien los produce la obligación de recolectarlos, tratarlos o disponer de ellos, señalando los medios para cada caso de residuo y el Decreto 1076 de 2015 donde se establece Plan de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo para el retorno a la cadena de producción-importación-distribución-comercialización, los residuos o desechos peligrosos o los productos usados, caducos o retirados del comercio.

A nivel distrito, acogiéndose a la legislación vigente, se manejan programas posconsumo, los cuales incluyen la recolección y disposición para pilas y baterías ion litio, provenientes de

productos eléctricos y electrónicos, de igual manera para baterías Plomo ácido utilizadas en vehículos, pero aún no se tiene un programa establecido para baterías Ion litio que provengan de vehículos.

Estado del Arte de la Investigación

La presente investigación tiene como tema central el análisis del ciclo de vida de las baterías Ion litio usadas en vehículos eléctricos, el manejo y disposición final de los residuos provenientes de este tipo de baterías, así como la reutilización y segundos usos. Enfocándose en los planes de manejo usados en países pioneros, así como los existentes en Colombia y a nivel distrito.

Se consultaron diferentes documentos, libros y artículos relacionados al tema de la investigación, textos que se caracterizan por describir los componentes y el funcionamiento de las baterías Ion litio, así como los diferentes modelos que existieron antes y que dieron lugar a la batería que hoy se utiliza, así mismo dan a conocer el ciclo de vida y muestran los resultados de un análisis detallado a cada una de las etapas que lo componen, donde se evidencia la importancia de la transición a energías renovables y el reciclaje de componentes para lograr que la batería sea un producto sostenible. En base a la información encontrada sobre legislación y planes de manejo existentes, se requiere de robustecer y mejorar los sistemas de gestión de este tipo de residuos a nivel mundial y en especial en Colombia.

En el artículo *las baterías de Ion litio, premio nobel de química*. Publicado por Híbridos y eléctricos, ecotecnología para el vehículo, muestra los dos modelos que le dieron vida a la batería que se usa actualmente, basada en el modelo de Stanley Whittingham, la cual contiene materiales como el óxido de cobalto, que permite la intercalación de iones litio y que remplazaron a los materiales propuestos por uno de los modelos, el de Stanley Whittingham, que producían las reacciones químicas que descomponían los electrodos como lo era el disulfuro de titanio ubicado en cátodo y al litio metálico en ánodo. (García, 2019)

Estos modelos son diseñados y mejorados por los tres investigadores: Stanley Whittingham, John Goodenough y Akira Yoshino merecedores del premio nobel de química 2019, como reconocimiento a la importancia que tienen las baterías en los vehículos eléctricos y como sistemas de almacenamiento de energías renovables, así como a los notorios avances, como lo es que ahora son más livianas; ya no pesan 2 toneladas si no cerca de 300Kg.

En el artículo de revisión *Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?*. Publicado por Springer, se evidencia que la mayoría de estudios de análisis de ciclo de vida, concuerdan en que el reciclaje puede evitar barreras futuras sobre recursos y/o materiales claves necesarios en la batería, a la vez que reduce la demanda de energía en la etapa de producción, también, en que el vehículo eléctrico puede contribuir a mitigar el calentamiento global, si la energía eléctrica que se usa proviene de fuentes limpias mas no del uso de combustibles fósiles.(Nordelöf et al., 2014)

Por otra parte, a lo que refiere al análisis del segundo uso de las baterías, el estudio “*del impacto en el análisis de ciclo de vida de dar o no una segunda vida a las baterías de vehículos eléctricos*. Modelo tres casos reutilizando las baterías como sistemas de almacenamiento para energías renovables y para reducción de factura eléctrica, con el fin de evaluar los impactos generados en un segundo uso. Concluyendo que la extracción del vehículo y los procesos de desmantelación y preparación de la batería es donde más se generan impactos negativos debido al gasto de energía y cambio de partes, ya los impactos ambientales generados en la nueva vida provienen del origen de la energía eléctrica que van almacenar las baterías. Del mismo modo se encontró como barrera para la implementación los altos costos de instalación de los sistemas fotovoltaicos tanto autónomos como los conectados a la red eléctrica.(Palerm, 2015)

Sin embargo, en la tesis, *plan de comercialización de un sistema de gestión de baterías en el mercado manufacturero de sistemas de baterías de iones litio en Alemania*. Se realizó una proyección con los países que más consumen baterías como lo es Estados Unidos, China, Japón, Alemania y Australia para sistemas de almacenamiento y se espera que para 2030 se duplique seis veces la adquisición del producto para este fin.(Cisterna Barros, 2019)

Estos estudios coinciden en mantener en uso la batería por el máximo tiempo posible, ya sea mejorando los ciclos de carga o dándoles un segundo uso, con el fin de evitar la extracción de materias primas, así mismo el gasto de energía requerido en el proceso de fabricación de nuevas baterías. También tienen en común en que se requiere la transición energética para que los vehículos eléctricos puedan contribuir a cero emisiones de carbono.

Lo que confiere, al reciclaje de los componentes al finalizar la vida útil de la batería, en el año 2020, fue publicado el artículo: *el impulso para reciclar las baterías de iones de litio*, por Chemistry World, donde se dio a conocer los esfuerzos que están haciendo las redes de investigación de reciclaje por mejorar, implementar nuevas técnicas e innovar los métodos que se usan actualmente como lo es el reciclaje directo, con el cual se puede recuperar el valioso cátodo conservando la estructura cristalina, lo que permite transformar las materias primas en un cátodo nuevamente. Este tipo de reciclaje permite recuperar otros materiales valiosos como láminas de aluminio y cobre, sales del electrolito y grafito del ánodo.(HUGHES, 2020)

El artículo concluye en que aún no es claro, cuál será el método para realizar reciclaje a gran escala, ya que se necesita comprender el valor de los residuos y compensarlo con el costo del proceso, lo que puede ser el caso, es que los diferentes métodos se usen en conjunto, dependiendo, los que sean más rentable y sirvan para diferentes tipos de baterías.

En otro estudio, *Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles*, publicado en el año 2019, para la colección de aniversario de la revista Nature, se describe y se evalúa el reciclaje y reutilización de baterías de iones de litio. Concluyendo que los residuos al finalizar la vida útil del vehículo estarán distribuidos por todo el mundo por lo anterior, se requiere de gestión y soluciones regionales. (Harper et al., 2019)

En países pioneros en fabricación de baterías Ion litio y en circulación de vehículos eléctricos como es el caso de China, desde el 2018 se han venido realizando actividades piloto para el reciclaje de baterías, como fortalecimiento a este tipo de programas, en el 2020 por medio de la ley de la república popular sobre la prevención y control de la contaminación por residuos sólidos, se dio el establecimiento de un sistema de registro de crédito para la prevención y control de residuos sólidos, incluidos residuos de LIB, así lo mostro el artículo *Estado de gestión de las baterías de iones de litio de desecho en China y un proceso completo de reciclaje de circuito cerrado*, también, dio a conocer que tipos de métodos de reciclaje se están implantando entre ellos pirolisis, hidrometalurgia y separación magnética como conclusión se dieron algunas sugerencias para mejorar el manejo de este tipo de residuos, las cuales contemplan designar e instalar sitios de recolección, el fortalecimiento de la educación sobre el reciclaje de este tipo de residuos y algún tipo de incentivo para motivar a la ciudadanía a reciclar. (Sun et al., 2021)

En el artículo *Reciclaje de baterías: descubre cómo es el proceso y la iniciativa de Enel X*, publicado en mayo del 2022 por Enel X, se dio a conocer iniciativas realizadas por la compañía en la Unión Europea, como lo son: Almacenamiento X y Pioneer, los cuales buscan optimizar las tecnologías de almacenamiento y darle una segunda vida a las baterías salientes de vehículos eléctricos como sistemas de almacenamiento de energía para plantas solares.

Así mismo la compañía creó para el año 2021 el primer Sistema de Almacenamiento de Energía con Baterías en Colombia, instalándolo en la Central Termoeléctrica Termozipa, así lo dio a conocer en su artículo, *BESS Termozipa: El innovador proyecto de almacenamiento de energía de Enel Colombia*. Con el proyecto se espera respaldar la red eléctrica, usando la energía almacenada en la red nacional cuando se requiera. (Enel, 2022a)

Por otra parte, en Colombia existen programas posconsumo enmarcados por *la ley 1672 de 2013*, aprobada y publicada por el congreso de la república, por medio de la cual se indicó los parámetros de la política pública de gestión de residuos de Aparatos eléctricos y electrónicos RAEE, (republica, 2013); así mismo por *el Decreto 1076 de 2015*, publicado por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, donde se estableció que se deberá tener un Plan de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo para su retorno a la cadena de producción-importación-distribución-comercialización, los residuos o desechos peligrosos o los productos usados, caducos o retirados del comercio generados en el territorio Nacional. (Minambiente, S.f-b)

El Programa posconsumo para baterías Acido -plomo usadas en vehículos, se mostró en el artículo *Baterías Acido- Plomo*, publicado por la secretaria de ambiente, allí se indicó que el programa es liderado por las empresas Recoenergy -Ecosteps - Claros Andina, las cuales se encargan de recoger, tratar y disponer este tipo de residuos, convirtiéndolos en materias primas que serán nuevamente incorporadas al proceso de fabricación, a la vez que se evita que se desechen de manera incorrecta generando afectaciones en el ambiente por el alto grado de toxicidad de sus componentes. (S. d. ambiente, S.f-a)

En otro artículo, publicado por la secretaria de ambiente en su página oficial, titulado, *Pilas y Acumuladores*, se dio a conocer los programas de posconsumo especiales para baterías ion litio, entre ellos, Pilas con el Ambiente y Recopila, por medio de los cuales se recolecta y da

disposición final a los residuos de baterías provenientes de dispositivos eléctricos y electrónicos, tales como celulares y computadoras. Excluyendo otro tipo de baterías como lo son, las usadas en vehículos eléctricos.(S. d. ambiente, S.f-b)

En todos los artículos e investigaciones mencionadas, se resalta el papel protagonista que juegan las baterías Ion litio en la transición a energías limpias, sirviendo como sistemas de almacenamiento en vehículos eléctricos y para energías no convencionales, como lo es la energía solar para sistemas fotovoltaicos. Se evidencia la necesidad de reutilizar y recuperar la mayor parte de componentes de la batería para que sean nuevamente incorporados al proceso de manufactura, evitando así la explotación de nuevas materias prima, para ello se debe estar innovando y mejorando los métodos de reciclaje existentes, al igual que los programas posconsumo junto a los planes de manejo de este tipo de residuos.

Planteamiento del Problema

El uso de combustibles fósiles ha ocasionado una serie de problemas socioambientales a nivel mundial, tales como calentamiento global, cambio climático, disminución de la calidad de aire, afectaciones en la salud humana y alteraciones en los ecosistemas. Si el calentamiento global cruza el umbral de seguridad de 2 ° C, las consecuencias podrían oscilar entre malas y catastróficas, para que el planeta se mantenga dentro de un aumento de 2 ° C en la temperatura promedio, el sector del transporte debe descarbonizarse (Santos, 2017), ya que es donde se generan más emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global; se estimó que en el 2014, alrededor del 23% de las emisiones a nivel global de CO₂ fueron originadas por el sector transporte, y el 20% se atribuían específicamente al transporte por carretera (Santos, 2017). Por otra parte el sector transporte constituye una fuente móvil de contaminación atmosférica, lo que la hace más difícil de combatir, propiciando graves afectaciones en la salud humana (Sarigiannis et al., 2017).

Como alternativa para mitigar y ser parte de la solución a estas problemáticas, los países más desarrollados y en general, los países del mundo simpatizantes del acuerdo de París, entre ellos Colombia, se están inclinando hacia la transformación y electrificación del sector transporte, lo cual implica la inserción paulatina y generalizada de vehículos propulsados por electricidad, en lugar de combustibles no renovables a base de carbono (Gong et al., 2020). No obstante, la inserción masiva de vehículos eléctricos implica una amplia demanda de los insumos requeridos para la fabricación de las baterías recargables, especialmente las de litio, las cuales son el corazón de este tipo de vehículos. Teniendo en cuenta que algunos de los materiales o elementos empleados en la fabricación de baterías pueden resultar escasos, y por tanto muy

costosos, tras un fuerte aumento en la demanda; por ejemplo, se ha estimado que el recurso mundial de litio es de aproximadamente 39 millones de toneladas y su precio de fabricación por batería está cerca 132 dólares KWh (Eléctricos, 2022), debido a que actualmente se ha mantenido una acogida rápida y generalizada de carros eléctricos que funcionan a partir de baterías recargables de litio.

En Colombia, durante la última década, y particularmente en Bogotá, como capital del país, es de las principales ciudades que ha estado realizando la integración paulatina de vehículos eléctricos, mediante pilotos desde el transporte público, con miras a que en un futuro cercano pueda comenzar a reducirse los niveles de emisiones de gases contaminantes, provenientes principalmente del transporte público, y reducir así, su participación del 10% en las emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad (Bradshaw, 2019). Sin embargo, la integración generalizada de vehículos eléctricos al sector de movilidad de la ciudad, a parte de los problemas en la demanda de insumos ya mencionados, y que se generan a nivel mundial, también puede generar a partir de ciertos niveles de penetración en el mercado de la ciudad, problemas en el manejo y la disposición masiva de residuos provenientes de las baterías recargables de litio. De acuerdo a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta problema: ¿Cuál puede ser la propuesta para el manejo y aprovechamiento de residuos generados por las baterías recargables de litio provenientes de los vehículos eléctricos de la ciudad de Bogotá?

Objetivos

Objetivo General

Diseñar una propuesta basada en el estudio del ciclo de vida de las baterías recargables de litio usadas en vehículos eléctricos, para la recolección, aprovechamiento y/o disposición final de sus componentes en la ciudad de Bogotá.

Objetivos Específicos

Realizar un estudio detallado al análisis ciclo de vida de las baterías recargables de ion litio, usadas en vehículos eléctricos de la ciudad de Bogotá.

Analizar los posibles impactos ambientales asociados a la culminación de la vida útil de las baterías recargables provenientes de vehículos eléctricos.

Diseñar una propuesta de reciclado y reutilización de algunos de los componentes de las baterías recargables de los vehículos eléctricos para la ciudad de Bogotá

Justificación

Al remplazar los vehículos de combustión interna, se tiene un aumento potencial de la penetración en el mercado de diferentes vehículos eléctricos, como los híbridos enchufables (PHEV) o los vehículos eléctricos de batería (BEV), los cuales generar una enorme demanda de sistemas de almacenamiento de energía electroquímica, como lo son las baterías de ion litio ,por eso con la inserción de estos vehículos en Colombia especialmente en la ciudad de Bogotá se espera un aumento de residuos provenientes de baterías.

De acuerdo a esto, resulta necesario y conveniente hacer estudios dirigidos hacia el análisis del ciclo de vida de este tipo de dispositivos (Xu et al., 2020) a fin de determinar desde la disponibilidad de materiales primarios hasta su disposición final tras caducar, formas que permitan el manejo, reciclado y aprovechamiento de residuos provenientes de ese tipo de baterías. Adicionalmente, es importante y conveniente, idear formas de recuperación del litio para un posible uso secundario como materia prima (Harper et al., 2019), debido a que es un elemento de abundancia limitada, cuyos principales yacimientos se encuentran en lugares específicos en el planeta y podrían llegar a escasear, aunque “algunos estudios reportan que los recursos de litio son suficientes para sustentar la demanda hasta al menos el final de este siglo” (Grubelt et al 2011).

Capítulo 1 Tecnologías de las Baterías Recargables para Vehículos Eléctricos

Baterías Ion Litio

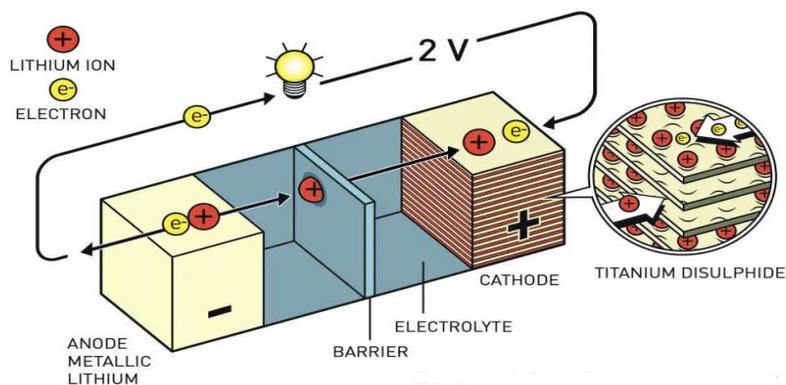
El litio es utilizado en las baterías, por ser el metal más liviano, por tener un alto potencial electroquímico y proporcionar el mayor volumen de energía. La densidad de energía de una batería de la familia del litio es un poco más del doble que en una batería de níquel-Cadmio. Su densidad puede llegar a 115 Wh/Kg (Ruíz, 2015).

Sin embargo, los primeros esfuerzos por crear una batería de litio no son recientes, se desarrollaron en el año 1912 por G.N. Lewis, después se debió aguardar hasta el año 1970 que apareció comercialmente la primera batería no recargable (Buchman, 2001) y hasta la década de los 80 para las baterías recargables. El primer modelo de batería recargable lo realizó Stanley Whittingham (Ver figura 1), quien encontró que el disulfuro de titanio era un material muy rico en energía y adecuado para ser parte del cátodo de una batería, para el ánodo utilizó parcialmente litio metálico, por tener una gran capacidad para liberar electrones (García, 2019).

“A nivel molecular, el disulfuro de titanio deja espacios en los que se pueden intercalar los iones de litio, lo que literalmente suponía que esta arquitectura daba lugar a una batería con un gran potencial, un poco más de dos voltios, sin embargo, el litio metálico es reactivo y la batería era demasiado propicia a las explosiones cuando se recargaba repetidamente, lo que no permitía su viabilidad” (García, 2019).

Figura 1

Batería de Whittingham.



Fuente: (García, 2019).

Nota. Es el primer modelo de batería recargable, donde se usó disulfuro de titanio en el cátodo y litio metálico en el Ánodo.

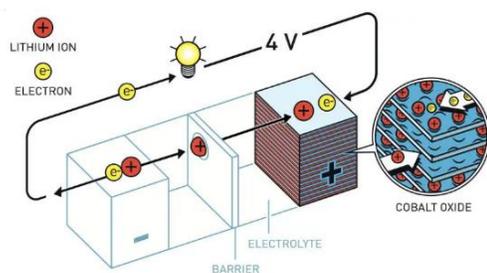
Hasta este momento, se habían hecho esfuerzos por lograr un batería recargable estable y segura, pero se presentaban problemas en el proceso de carga, debido a la actividad reactiva del litio metálico. En consecuencia, se determina que el ciclaje reducía la estabilidad térmica, causando una expansión interna, que producía una reacción violenta.

Los estudios continuaron, hasta que en 1980 se dio a conocer el modelo de John Goodenough (ver figura 2), quien demostró que remplazando el disulfuro de titanio por óxido de cobalto con iones de litio se podía lograr hasta cuatro voltios. Este hecho supuso un importante avance, que posteriormente guiaría a baterías mucho más potentes como la batería de Akira Yoshino en 1985, quien inventó la primera batería de iones de litio comercialmente viable, donde en lugar de utilizar litio reactivo en el ánodo, usó coque de petróleo, un tipo de carbono que, como el óxido de cobalto del cátodo, puede intercalar iones de litio como se observa en la figura

3. El resultado fue una batería mucho más segura, ligera y resistente, que podía cargarse muchas veces antes de que su rendimiento se disminuyera significativamente. (García, 2019).

Figura 2.

Batería de John Goodenoug

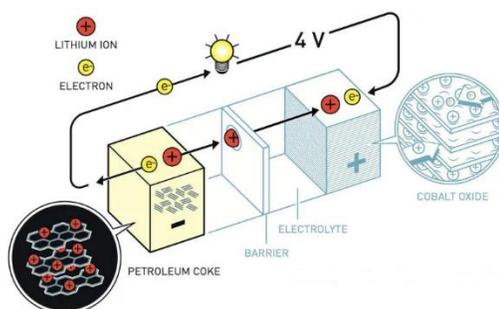


Fuente: (García, 2019).

Nota. Con este modelo se demostró que reemplazando el disulfuro de titanio por óxido de cobalto con iones de litio, se podía lograr hasta cuatro voltios de manera estable.

Figura 3

Batería de Akira Yoshin.



Fuente: (García, 2019)

Nota. Primera batería de iones de litio comercialmente viable, donde se utilizó en el ánodo coque de petróleo en cambio del litio reactivo. Este es un tipo de carbono que, como el óxido de cobalto que lleva el cátodo, puede intercalar iones de litio.

Por tanto, el funcionamiento de las baterías de ion-litio recargables o secundarias que se utilizan hoy en día, “no se basan en reacciones químicas que descomponen los electrodos, sino en iones de litio que fluyen de un lado a otro entre el ánodo y el cátodo” (García, 2019).

Basándose en un proceso de inserción- des inserción de iones Litio (Li+) (Fonseca, 2011). La reacción que ocurre se puede mostrar de la siguiente manera:



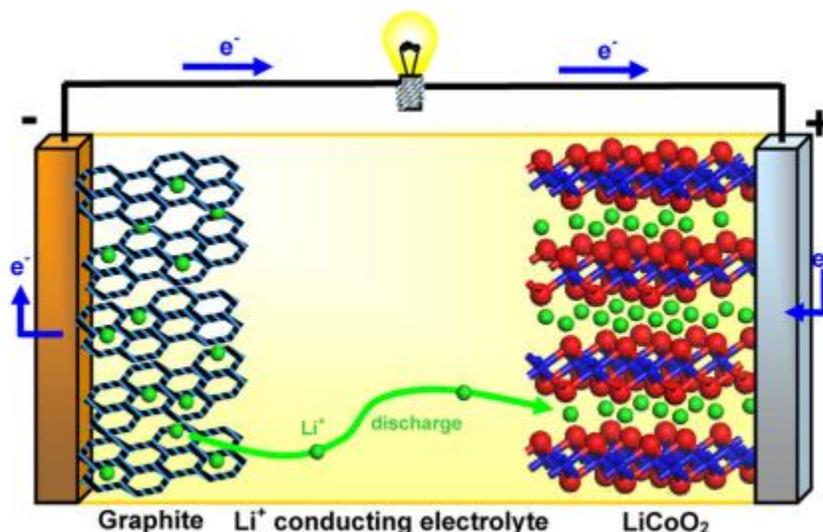
Los iones de litio o liquido iónico conductor, es también conocido como electrolito debido a que sobre este circulan electrones, que son los que crean una diferencia de potencia cuando se trasladan de un lado positivo a otro negativo (avance, 2021).

Las reacciones se presentan en estado sólido entre dos compuestos de implantación como electrodos. Uno de los compuestos se denominado Huésped (M); de naturaleza iónica, reacciona tomando lugares vacantes (a) en la estructura de otra especie denominada Anfitrión (A). Uno de los electrodos contiene al litio inicialmente ionizado, de tal modo que durante los procesos de carga y descarga se inserten en el electrodo contrario. Este tipo de baterías se mantiene de forma estables al aire (húmedo), por lo que no se requiere condiciones de ensamblado tan estrictas como las que utilizan Litio metálico como electrodo (Fonseca, 2011).

Así, lo que sucede en el proceso de descarga, ver figura 4, es que los iones se liberan del ánodo y se trasportan hasta el cátodo y cuando la batería se conecta a un cargador, ocurre lo contrario y la batería se recarga.

Figura 4

Fase de descarga de una batería.



Fuente: (Bruce, 2008).

Nota. Se observa como los iones de litio pasan del ánodo hacia el cátodo en el proceso de descarga.

En el proceso de carga y descarga, las baterías de ion litio son más eficientes comparándolas con las baterías de Acido Plomo, al tener un tiempo aproximado de carga de aproximadamente de 1 hora, debido a que evitan el efecto memoria que se produce al someter las baterías a ciclos constantes de carga y descarga. Si el vehículo se expone a periodos prolongados de desuso, la pérdida de carga es mínima, logrando que el vehículo esté disponible después de estar guardado (avance, 2021).

El potencial de salida de las baterías, lo da la diferencia de potencial entre ambos compuestos de intercalación respecto al par Li⁺/ Li. Para lograr un potencial lo más alto posible, se debe seleccionar un material como electrodo positivo, que tenga un potencial alto de intercalación respecto al Litio y como electrodo negativo, un material que sea lo más bajo posible.

Tabla 1.

Electrodos positivos de alto potencial para baterías ion- Li.

Electrodos (+) de alto potencial	Composición	Potencial (v)
1	$LiCoO_2$	3,8- 4,5
2	$LiNiO_2$	3,5-4,4
3	$LiMn_2O_4$	3,6-4,5
4	$LiFePO_4$	3,7-4.5
5	LiV_2O_5	2,9-3,3

Fuente: (Fonseca, 2011)

Nota. La tabla 1 muestra 5 electrodos positivos, que son los más usados por representar un alto potencial (v).

Tabla 2.

Electrodos negativos de bajo potencial de baterías ion -Li, (Fonseca, 2011)

Electrodos (-) de bajo potencial	Composición	Potencia (v)
1	SnO_2	0,5-1,2
2	SnO	0,6-1,3
3	TiS_2	1,8-1,9
4	TiO_2	1,8-2,1

Fuente: (Fonseca, 2011)

Nota. La tabla 2 muestra 4 electrodos negativos, los cuales son los más usados por su bajo potencial (v)

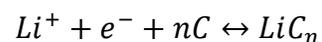
En el proceso de carga y descarga, cuando el litio sale de la estructura del cátodo y se acumula en el ánodo, se forma un compuesto de intercalación de grafito LiC_6 , LiC_{12} O LiC_{18} , este es un proceso reversible; Por lo tanto, se puede dar en sentido contrario y liberar el litio (Gonzalez, 2021).

Pero también, pueden suceder procesos irreversibles como la formación de óxido de litio que puede alterar la potencia. Esto se debe a que el litio se acumula en el ánodo en forma de óxido de litio, disminuyendo la oferta de litio en la batería (Gonzalez, 2021).

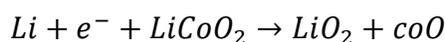
Reacción en el cátodo (de $LiCoO_2$)



Reacción en el Ánodo (de grafito -C)



Producción de Óxido de Litio

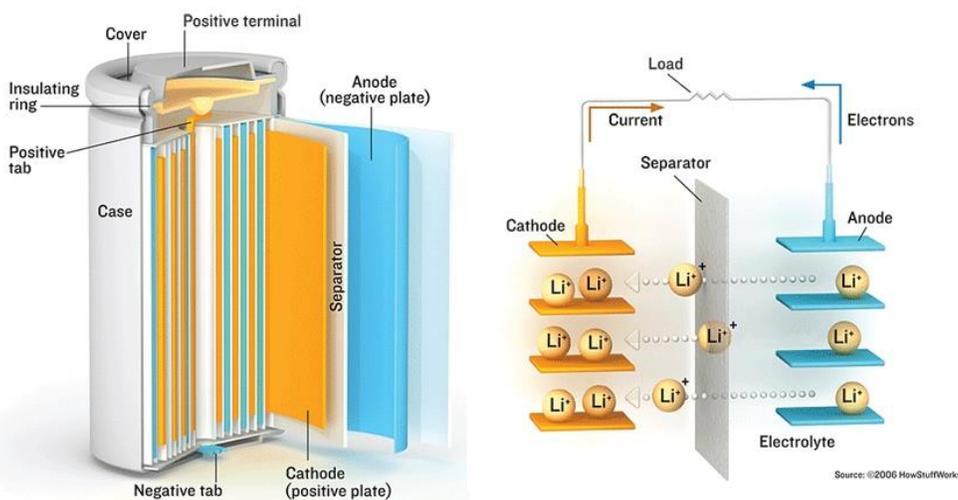


La manufactura de este tipo de baterías por lo general consta de tres fases: producción de electrodos, producción de celdas o células individuales y acondicionamiento de las celdas. En el diseño y producción de una celda ion litio (Ver figura 8) se debe cumplir con ciertos requisitos para su debido funcionamiento:

- Cada hoja de cátodo debe estar enfrente de una hoja de ánodo con la misma o mayor capacidad
- Los cátodos y ánodos deben estar eléctricamente aislados entre sí.
- Se debe realizar la humectación electrolítica para garantizar la conducción iónica en todas las partes de la celda
- Se debe garantizar un buen contacto entre conductores, también entre materiales activos y los conductores, de igual forma garantizar la mejor tasa de conductividad eléctrica en todas las partes del sistema (Pettinger et al., 2018).

Figura 5.

Partes de una celda de una batería de ion litio.



Fuente: (Gonzalez, 2021).

Nota. Se puede visualizar el funcionamiento y las partes de una celda, tales como estructura, separador, cátodo, ánodo y el electrolito.

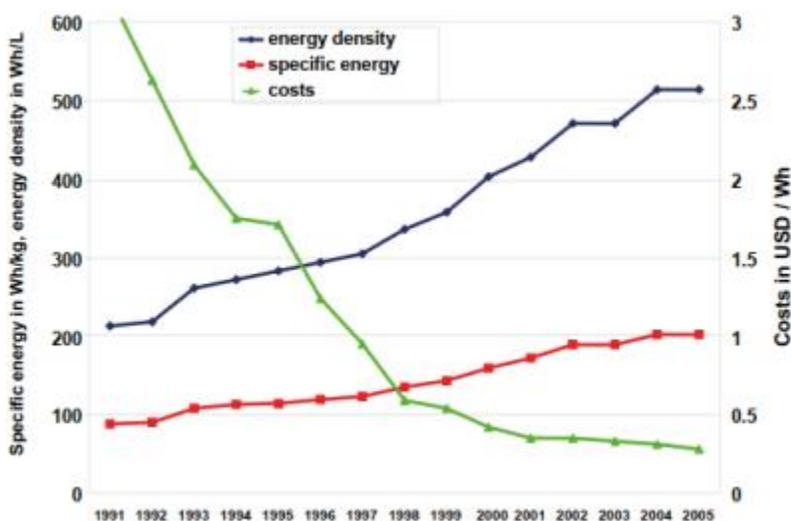
Uno de los problemas que se presenta, en el desarrollo de estas baterías es la pesquisa por mejorar las propiedades de los ánodos para evitar que constituyan el elemento limitante con respecto a la capacidad y ciclabilidad. Se propone utilizar estaño ya sea en forma de óxidos o compuestos Inter metálicos para remplazar el carbono, con el cual están constituidos la mayoría de los ánodos en la actualidad, con el fin de mejorar su capacidad, ya que el carbono tiene una capacidad específica baja, sin embargo, al utilizar electrodos de estaño se expone a la pérdida progresiva del electrodo, debido a su variación de volumen en la intercalación – des intercalación de los iones litio.

En estos casos se podrían implementar depósitos ramificados y nanoestructurados de estaño, empleando como soportes matrices de alta tridimensionalidad para mejorar la relación área/volumen, así facilitar el transporte de materia para la intercalación de litio.

A pesar de los múltiples desafíos que quedan por afrontar, las últimas innovaciones han hecho que el costo baje y que la tecnología mejoré, como se muestra en la Figura 6. Desde 1991, el costo de las células de los iones de litio se ha reducido más de 12 veces y la densidad de energía ha avanzado más de 2,5 veces aproximadamente.

Figura 6

Evolución de la energía específica, densidad de energía y costos de las celdas de iones de litio entre 1991 y 2005



Fuente: (Cisterna Barros, 2019).

Nota. Se puede apreciar un descenso en los costos, a la vez que mejora la tecnología en densidad y energía específica.

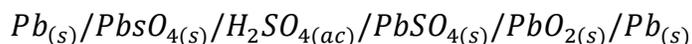
Baterías Plomo y Acido

Es una de las baterías más utilizadas en sector automotriz y algunas bicicletas, debido a que son un tipo de baterías con larga trayectoria, de bajo costo y fáciles de encontrar; se han utilizado durante más de un siglo desde los primeros hallazgos que tuvieron lugar en 1800, cuando Alessandro Volta descubrió la batería galvánica, luego en 1859 Gastón Planté creó la

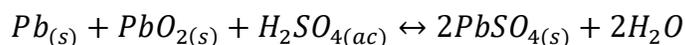
primera batería de ácido-plomo, marcado por su hallazgo sobre el incremento de la capacidad de almacenamiento de las celdas. Después para el año 1881, el científico Camille Fauré, optimizó algunas de las características que se habían implementado anteriormente, como la sustancia que se usaba para cubrir la superficie de las placas, con lo que se logró un tiempo récord de fabricación de las placas de la batería. A eso se le sumó el desarrollo paralelo de los equipos de generación de corriente eléctrica que facilitaron enormemente la carga de las baterías (Sam 2016).

Este tipo de baterías se constituyen con diferentes celdas que tienen dos electrodos (positivo y negativo), un separador y un electrolito, “el electrodo Negativo es el plomo y el Positivo, el óxido de plomo PbO_2 , sumergidos en una solución acuosa de ácido sulfúrico” (Fonseca, 2011).

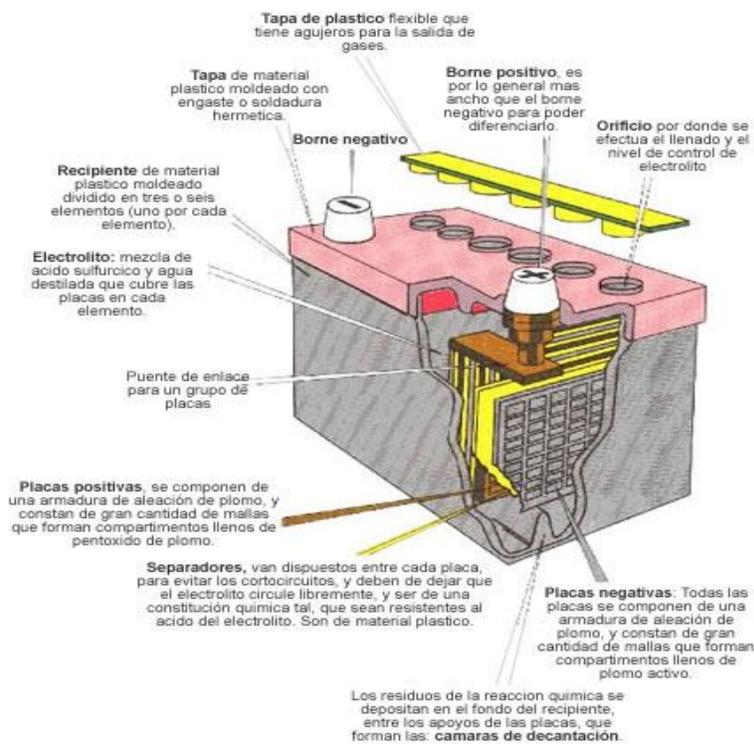
Se puede representar como:



Las reacciones electroquímicas que se dan son las siguientes (Fonseca, 2011):



Las celdas son por lo general de plástico y se conectan en serie para mayor voltaje. Dentro de estas se colocan de manera alterna placas positivas y negativas, el electrolito que hace de conductor permitiendo el paso de electrones entre los electrodos y el separador que es una membrana porosa que permite el paso de Iones cargados y a la vez evita el contacto entre los electrodos.

Figura 7*Funcionamiento de un batería de Acido - plomo*

Fuente: (Areatecnologia, S.f)

Nota. Se visualiza las partes que constituyen este tipo de baterías y la función que cumplen en ella.

Las baterías de Plomo Acido son normalmente de 12 v si contiene 6 celdas, aunque hay vehículos anticuados o motocicletas que usan baterías de 6 voltios con 3 celdas (Fonseca, 2011).

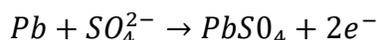
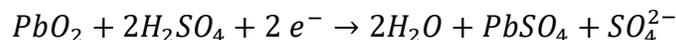
A lo anterior hay que sumarle que sus iones son de plomo; por tanto, el tiempo de carga es mucho más lento, en promedio 8 horas para cargar al 100%, exponiéndolas a recalentamiento por carga continua. (avance, 2021)

En el proceso de carga, el sulfato de plomo II, es reducido a plomo metal en el cátodo (polo negativo) y en el ánodo se forma oxido de plomo IV (PbO_2). Ya en el proceso de descarga pasa lo contrario, el óxido de plomo IV ahora está en el Cátodo, pero minimizado a sulfato de

plomo II y el plomo elemental, es oxidado en el ánodo, generando sulfato de plomo II. Los electrones intercambiados se utilizan como corriente eléctrica en el circuito externo.

Durante la descarga disminuye la concentración de ácido sulfúrico y se genera más cantidad de agua en la reacción (Ruíz, 2015).

La reacción química que se da es la siguiente (Ruíz, 2015):



La densidad del ácido sulfúrico puede servir de indicador del estado de carga de la batería, debido a que el ácido sulfúrico concentrado tiene una densidad mayor que el ácido diluido (Ruíz, 2015). Cuando ya va finalizando la vida útil de este tipo de baterías, el sulfato de plomo (II) empieza a formar cristales muy grandes que ocasionan que la batería no responda correctamente a los procesos internos, como lo es la reducción de la capacidad de réplica de la carga; por tanto, se dice que la batería se ha sulfatado.

Baterías Níquel – Cadmio

La batería de Níquel y cadmio fue inventada en Suecia en 1899. En la actualidad este tipo de baterías por lo general, tienen uso restringido en algunos países desarrollados, como es el caso de la Unión Europea, debido a la alta toxicidad del cd (Zhao et al., 2022), el uso del cadmio solo se permite en aplicaciones médicas y en herramientas eléctricas con requisitos de alta potencia (Moeller, 2018). En algunos países ya no se fabrican, por presentar desventajas en comparación con otros tipos de baterías, su tensión nominal por celda es de 1,2 v, lo que representa un valor muy bajo; por lo cual, se requiere la conexión en serie de un mayor número de celdas para alcanzar cierta tensión y su precio es muy alto en comparación con las baterías de plomo ácido (Peña Ordoñez, 2011).

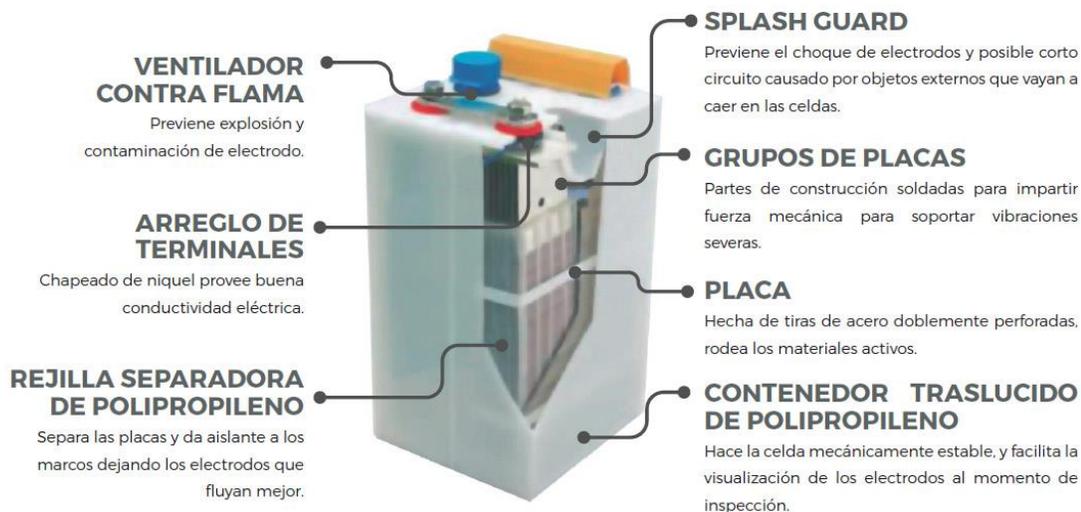
Sin embargo, son baterías que admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya estén cargadas, aunque no se almacene la energía, generan buena fiabilidad, no fallan de manera inesperada como las de plomo ácido (Peña Ordoñez, 2011). Pero se pueden ver afectadas por cargas o descargas parciales repetidas, causando disminución en la capacidad de energía nominal. El efecto memoria fue comprobado en un estudio de análisis por distracción de rayos x en baterías Ni Cd y Ni-MH. Concluyendo que la principal causa del efecto memoria fue la formación y acumulación de gNiOOH en los electrodos durante descargas superficiales o sobrecargas repetidas. Como alternativa se presentó un ánodo con nano cables de Cd(OH) que adicional eliminaría el 80% de la contaminación generada por el Cd tóxico liberado al ambiente (Zhao et al., 2022).

Las baterías Níquel y Cadmio manejan una tasa promedio de auto descarga del alrededor del 15%- 20% por mes, alta auto descarga en comparación con las de ion litio que manejan 1% - 3% mes (Zhao et al., 2022), como ventaja es que trabajan muy bien a bajas temperaturas incluso hasta $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la fabricación se utiliza tecnología de bobinado con materiales activos en finas laminas colectoras de corriente o redes, el electrolito es potasa cáustica al 20% y el cátodo por lo general hidróxido de óxido de níquel (NiO(OH)) (Moeller, 2018) las placas son de acero para que no reaccione con los otros componentes, así la estructura no debe ser cambiada en todo su tiempo de vida, de igual manera las terminales están hechas de acero pero niquelado con alta conductividad y alto rendimiento, ya los separadores están hechos por lo general de plástico siendo aislante entre las placas y mejorado la circulación del electrolito dentro de las celdas (KTRONIX, S.f).

Figura 8.

Partes de una batería de Níquel- Cadmio.



Fuente:(KTRONIX, S.f).

Nota. Se visualiza la función de cada una de las partes que conforman este tipo de baterías.

Capítulo 2 Generalidades del Ciclo de Vida

¿Qué es el Análisis de Ciclo de Vida?

El ciclo de vida es una metodología que surgió con el aumento de la conciencia ambiental en la población, donde se identifican los aspectos e impactos ambientales más potenciales que ocurren a lo largo de la vida útil del producto, desde la extracción de materia prima, pasando por la fabricación, comercialización, uso, tratamiento hasta llegar a la disposición final; de la cuna a la tumba. Hoy en día se habla de que sea de la cuna a la cuna, logrando ese movimiento circular, que lo que muera sirva para crear nuevamente el producto y que así, los residuos que se dispongan sean mínimos reduciendo el impacto ambiental (ICONTEC, 2007).

Por lo general el análisis del ciclo de vida ACV está compuesto por cuatro fases:

1. La fase de definición del objetivo y el alcance
2. La fase de análisis del inventario
3. La fase de evaluación del impacto ambiental
4. La fase de interpretación

Con el análisis del Ciclo de vida se puede entender mejor los impactos ambientales y poder darles solución identificando oportunidades de mejora en las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, lo cual permite elegir indicadores y técnicas de medición para optimizar el desempeño ambiental, de hecho, llegar a la conclusión de rediseñar el producto o proceso. Así mismo, aporta información fundamental para la toma de decisiones por parte de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, incluyendo planificación estratégica y establecimiento de prioridades.

Objetivo y Alcance

En el objetivo debe indicar la aplicación prevista, debe exponer los motivos por los cuales se lleva a cabo el estudio, la audiencia para la cual van dirigidos los resultados, si se va a centrar en un o más productos y cuales etapas del ciclo son el objetivo. Dentro del alcance se establece el sistema del producto a utilizar, la unidad funcional del estudio, los límites del sistema, las categorías de impacto escogidas y la metodología de evaluación del impacto. Estos datos deben ser claros para una buena interpretación de resultados (Nordelöf et al., 2014).

La unidad funcional es uno de los ítems más importantes, ya que define las características del producto, sirve de referencia para relacionar entradas y salidas del sistema, permite la comparación entre productos. Ejemplos: Cantidad de material usado para envasar un litro de leche, cantidad de pan (Kg).

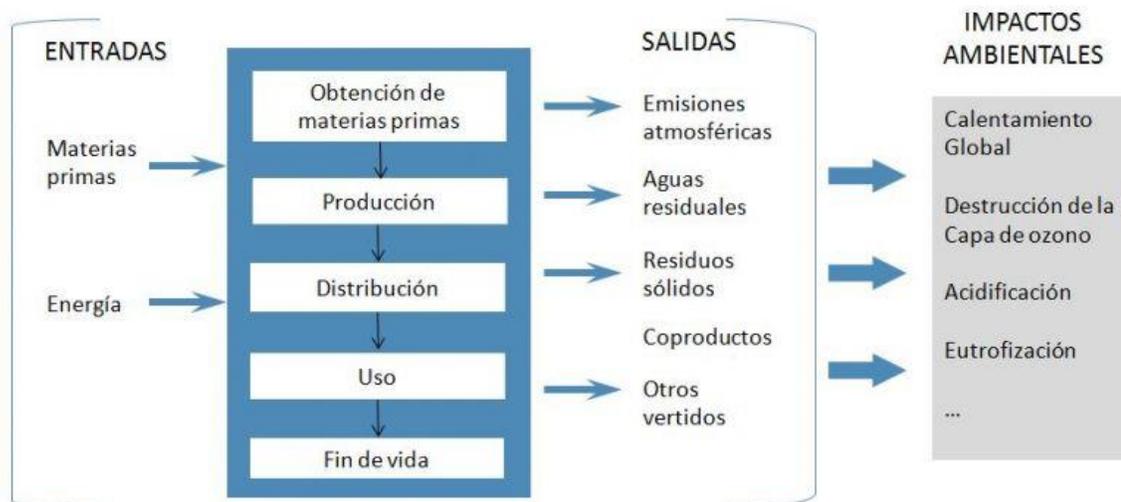
Los límites del sistema son los procesos unitarios que se van a incluir en el ACV. Esta decisión depende de varios factores como la aplicación del estudio, la restricción de costos y el público para el cual va dirigido. (ICONTEC, 2007). Ejemplos: Extracción de materias primas hasta que ingresa a la etapa de producción, de la extracción hasta ya la obtención del producto o de la extracción hasta el consumo del producto.

Inventario del Ciclo de Vida

Implica la recopilación de datos y el cálculo de entradas y salidas del sistema de producto en estudio. Los datos son por cada proceso unitario y pueden ser tales como (las entradas de energía, de materia prima; entradas auxiliares, los productos, coproductos; residuos, emisiones, vertidos al agua o al suelo), así como se muestra en la figura 9.

Figura 9

Fases interactivas de un ACV según la ISO 14040.



Fuente: (ESPAÑA, S.f).

Nota. Se visualiza como sería un inventario de un ACV, donde tendremos entradas y salidas por las diferentes etapas y/o procesos del producto, de las cuales se pueden derivar impactos, que serán identificados y evaluados por el estudio.

Evaluación del Impacto

En esta fase se tiene como finalidad evaluar cuan significativos son los impactos ambientales potenciales, asociando los datos del inventario con las categorías de impacto ambientales y con los indicadores de esas categorías. Hay elementos que se consideran obligatorios los cuales son: elección de categorías de impacto, indicadores de dichas categorías y modelos de caracterización (ICONTEC, 2007).

Análisis del Ciclo de Vida de las Baterías Ion Litio

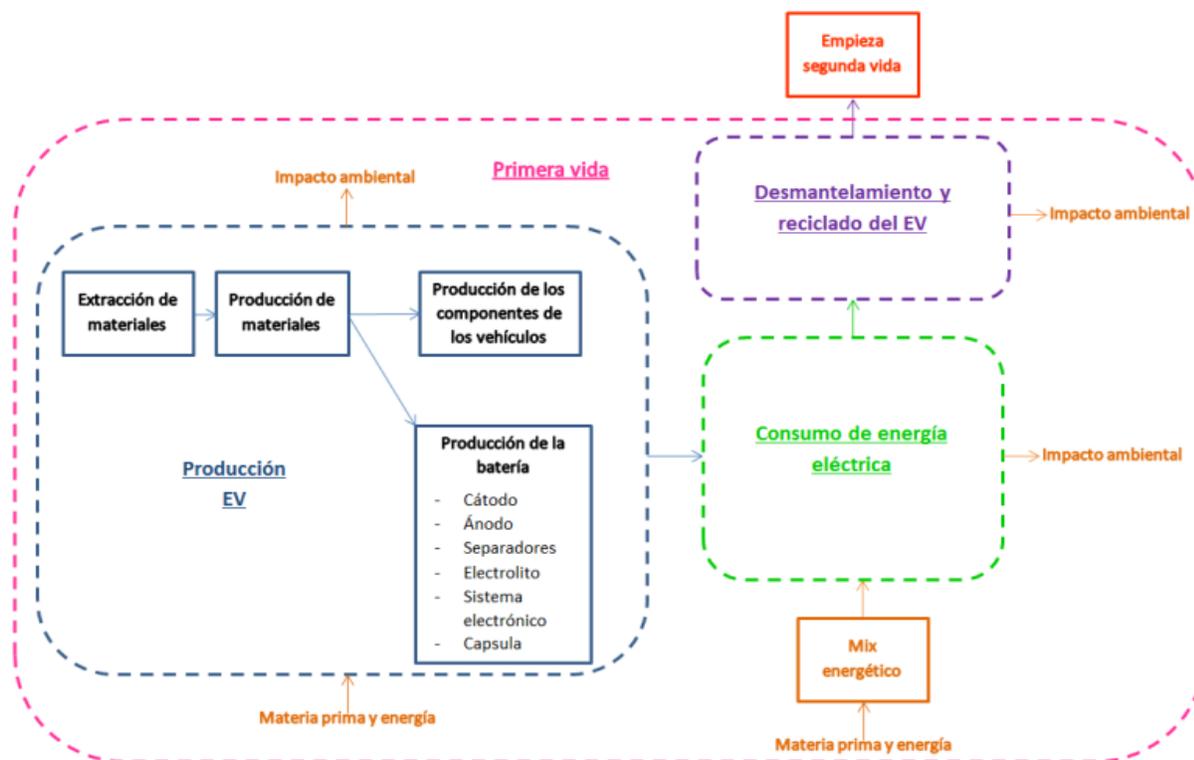
Se han realizado diferentes estudios sobre análisis del ciclo de vida de las baterías de ion litio, los cuales abarcan tanto la primera vida, como segunda vida o el ciclo completo. Algunos estudios y/o revisiones a los ACV, resaltan que algunas conclusiones parecen dibujadas sin

fundamento, esto se puede manifestar por una falta de claridad en el propósito. En el análisis de resultado o discusión se enfocan con facilidad en los detalles de los resultados numéricos y como consecuencia de una apariencia de complejidad y resultados divergentes, generándose un mayor impacto en el primer caso.

Con algunos estudios de ACV se puede concluir que se requiere trabajar más en la reutilización de baterías para no tener que llevar a cabo todo el proceso de fabricación, el cual supone gran demanda de energía y materias primas, como se puede visualizar en la figura 10, ingresa energía y materia prima; como impacto se tendría CO_2 , cambios paisajísticos, agotamiento de recursos naturales y vertimientos al recurso hídrico, provenientes de los procesos de explotación y extracción de la materia prima. Después en el uso de la batería se genera impacto por la procedencia de la energía con la que se cargan las baterías; sin embargo, el impacto se podría minimizar si se utilizaran energías renovables para obtener la energía eléctrica.

Figura 10.

Inventario para primera vida de una batería



Fuente: (Palerm, 2015).

Nota. Observamos que en la etapa de producción ingresa materia prima y energía, como salida tendríamos consumo de recursos y de energía, lo que genera impactos ambientales.

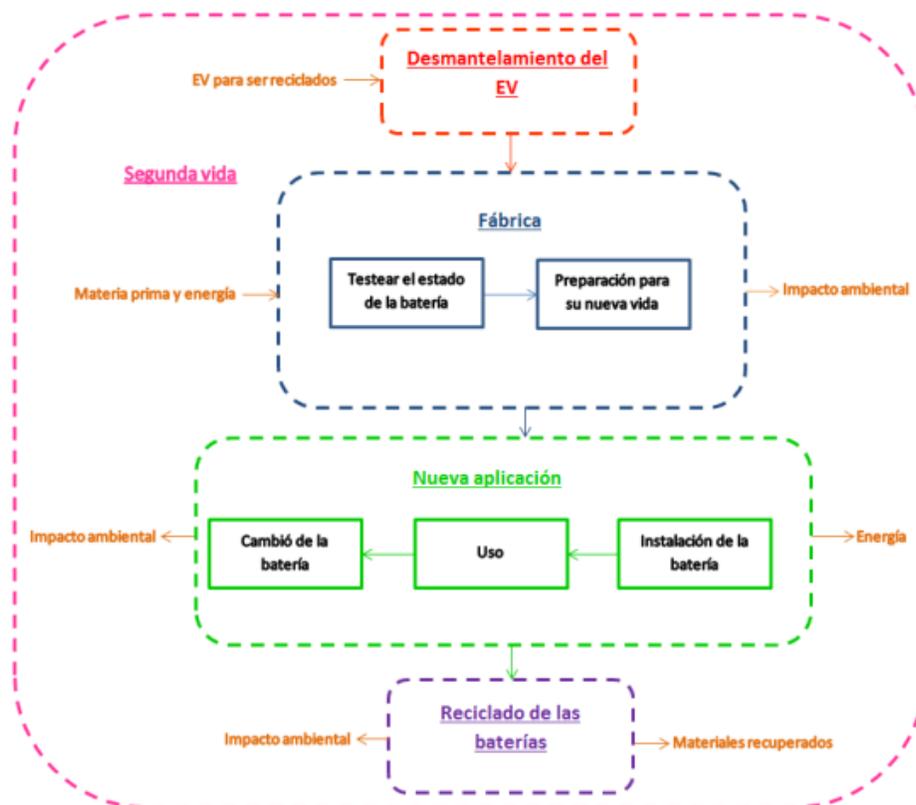
Ya lo que refiere a la segunda vida de la batería, el mayor impacto se da en la desmantelación y preparación para el segundo uso como se puede observar en la figura 11, ingresa energía y materia prima y como impacto se tendría contaminación por residuos provenientes de partes que se hayan cambiado.

Para seguir promoviendo la reutilización se debe trabajar en varios aspectos como lo es los costos que supone la instalación de un sistema fotovoltaico, ya que un segundo uso para las baterías es como sistemas de almacenamiento para estos sistemas. Actualmente, dependiendo del país, la implementación e instalación puede ser un poco costosa para el usuario, por lo que se

ofrece inicialmente como una contribución al ambiente, mas no como una inversión a corto plazo.

Figura 11

Inventario para segunda vida de una batería



Fuente: (Palerm, 2015).

Nota. Se puede observar que, en la fábrica, en el proceso de preparación ingresa materia prima por si hay que cambiar piezas y energía, ya como salidas tendremos emisiones, gasto de energía y residuos, lo cual genera su respectivo impacto ambiental. En el proceso de reciclaje, aunque se obtienen materiales recuperados, se tienen impactos según el método usado.

Análisis del Inventario

Extracción de Materias Prima. Entradas: Metales (Níquel, cobalto, litio), Agua, energía eléctrica. El ciclo de vida de las baterías de ion litio inicia con la extracción y recolección de materiales, entre ellos metales como níquel, manganeso, cobalto y el litio. Estos varían dependiendo la batería, debido a que no existe una batería de vehículo eléctrico estándar. Las químicas populares incluyen: Aluminio de níquel cobalto, óxido de manganeso de litio y cobalto de níquel magnesio. (Hughes 2020); Pero, en la actualidad se está incursionando en baterías solo de litio y azufre “El equipo de desarrollo ha mantenido el litio y ha suprimido de la composición el níquel, el cobalto, el aluminio y el magnesio, de manera que elimina la dependencia de materiales escasos y caros, lo que abarata la producción” (García 2019).

Cobalto. El cobalto es un metal de transición de color blanco- azul. Por lo general se halla con minerales donde se encuentra cobre y níquel; suele encontrarse en forma de cobaltita, esmaltita y eritrita. Lo pueden atacar halógenos y azufres, pero está protegido de la oxidación por una capa de óxido pasivante, lo que lo hace resistente a sustancias corrosivas como el ácido nítrico, fosfórico y sulfúrico. Se utiliza principalmente en la batería recargable como cátodo (como LiCoO_2) y se considera uno de los elementos más abundantes; se estima que las reservas mundiales como metal son de 7,1 Mt “Las principales reservas de cobalto se encuentran en la República Democrática del Congo (RDC) que representan el 47% del total mundial”; sin embargo, en algunos países se produce como subproducto del níquel como: Australia, Cuba, Zambia, Canadá, Rusia y Nueva Caledonia produce, como depósitos de sulfuro de Ni-Cu alojados en rocas máficas y ultramáficas en Australia, Canadá y como producto de cobre sedimentario se encuentran los depósitos de Congo y Zambia (Meshram et.al; 2018).

Grafito. Se puede encontrar en diferentes formas: natural (escamoso y veta) y amorfo (microcristalino). El más utilizado como Ánodo para las baterías recargables de Ion litio (LIB) es grafito de vena natural por poseer una alta cristalinidad y pureza, lo que supone una reducción de costos en la producción al no requerir proceso de purificación. La identificación de este tipo de grafito natural es bastante singular, debido a que posee diferentes variaciones morfológicas con diferentes características estructurales y físicas (Sasanka Hewathilake et al., 2017).

Las reservas de grafito por lo general se encuentran en Asia del sur, en Sri Lanka con un contenido alrededor de 95 a 98% de carbono puro, en forma bruta.(Sasanka Hewathilake et al., 2017) también, se puede encontrar en rocas pertenecientes al área de Ruzhinskaya en Rusia. Otro de los depósitos más grandes de grafito natural se ubica en China suponiéndose que posee entre el 70 y 80% de total a nivel mundial. Ya lo referente a la extracción, presenta varias restricciones legales y ambientales; por ese motivo, existen varios métodos de extracción, los cuales dependen de las condiciones geológicas de yacimiento como ubicación, profundidad y rocas cercana.

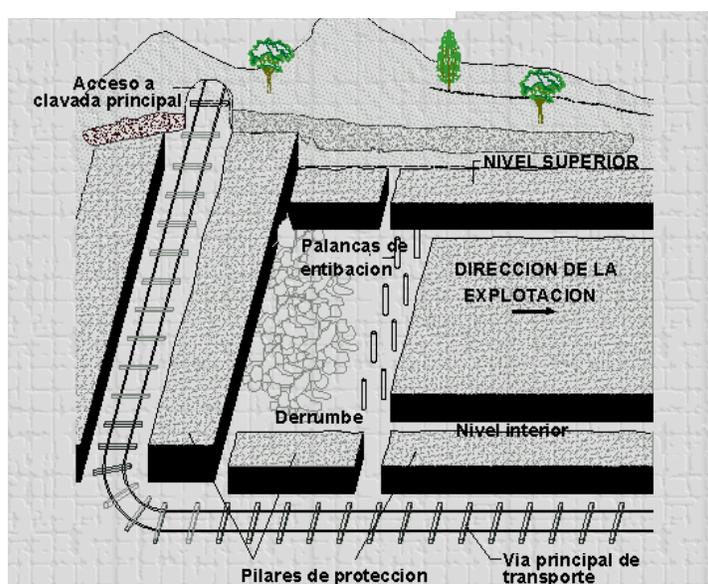
La explotación se puede realizar por ángulos con respecto al plano horizontal (horizontales con ángulo $< 25^\circ$, inclinados con ángulos entre 25° y 45° , verticales con ángulos mayores $> 45^\circ$) para cada una de ellas se tiene dos métodos (tajos y frentes cortos)

En el método de tajo largo es un sistema de explotación que se adapta a yacimiento horizontales con grosor entre 1m y 2.5 m, formando un sector, bloque o panel de explotación con un frente amplio y continuo, cubriendo desde varios cientos de metros hasta unos 2 km y el ancho es mucho menor, variando entre unos 60 m y 200 m, el cual se puede trabajar en avance o en retirada. Se puede observar en la figura 12.

Lo constituye el bloque de explotación, el cual está delimitado por dos vías, una destinada para el transporte del carbón y otra superior para el acceso y abastecimiento de materiales; entre estas dos vías existe otra vía que va en el sentido de la inclinación del manto y su longitud es igual al ancho del panel y es el frente del tajo de explotación.

Figura 12.

Método de tajo largo.



Fuente: (Upme, S.f)

Nota: Características del método de tajo largo.

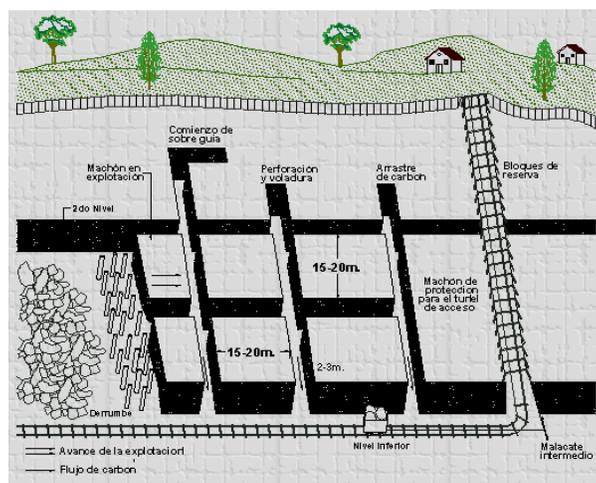
En los métodos de frentes cortos, se encuentran varios, entre ellos cámara y pilares, que se utiliza para yacimientos multimantos, con capas horizontales o con una leve inclinación, menor del 30°. El método consiste en dejar pilares de carbón, con el fin de sostener el techo, en formar cámaras que son agujeros que se construyen de forma múltiple y paralela cuando se unen con las cámaras transversales y forman los pilares de protección que sirven de soporte natural en la explotación. La extracción del carbón se hace generalmente en forma manual, a pico y pala o

con explosivos; se comienza en la parte superior de los tambores descendiendo hasta llegar a las galerías de transporte o niveles, dejando así, cámaras del mayor ancho posible. Se puede observar en la figura 13.

El proceso de explotación se puede realizar en avance o retirada y tiene dos etapas, la primera está conformada por las cámaras y pilares, la segunda, una vez desarrollada la explotación hasta sus límites de diseño, se hace la recuperación o barrido de los pilares, dejando solamente los pilares de borde el panel.

Figura 13.

Cámaras y pilares



Fuente: (Upme, S.f).

Nota. Características del método cámaras y pilares.

Litio. El litio es el elemento numero 27 más abundante en la tierra. Se produce a partir de una variedad de fuentes naturales, por ejemplo, en minerales, de los cuales se conocen aproximadamente 150, entre ellos: roca pegmatita y sedimentaria. También se encuentra en otras formas inusuales como en espodumena, arcillas como hectorita, lagos salados y subterráneos, depósitos de salmuera, etc. (Meshram et.al; 2019). A partir de estos últimos se produce carbonato de litio, que es el tipo de litio más buscado para baterías de autos eléctricos (Narins, 2017)

El proceso de extracción en espodumena o salares de altura, a pesar de que es económico no es sencillo de realizar. En la superficie y las capas siguientes de los salares predominan mayormente compuestos como el cloruro de sodio – sal de mesa – y cloruro de potasio y solo se puede llegar a encontrar un gramo de cloruro de litio por litro. En el método más usado se extrae del suelo la salmuera, para luego ser colocada en piletas de gran tamaño y superficiales, estas al entrar en contacto con la radiación solar, evapora el agua y por diferencia de solubilidad, van precipitando seguidamente el cloruro de sodio, el cloruro de potasio y por último queda el cloruro de litio, que deberá seguir siendo tratado para su transformación en carbonato de litio y extracción definitiva.

Se ha planteado la idea de imitar el funcionamiento de las baterías para obtener litio de salmuera: A partir de una celda electrolítica que funcionaría como una esponja, la cual usaría sus dos electrodos para captar de la salmuera, uno de ellos litio y el otro cloruro, de forma selectiva, evitando el potasio y el sodio, sin usar agua ni agregar químicos, siendo más eficiente.

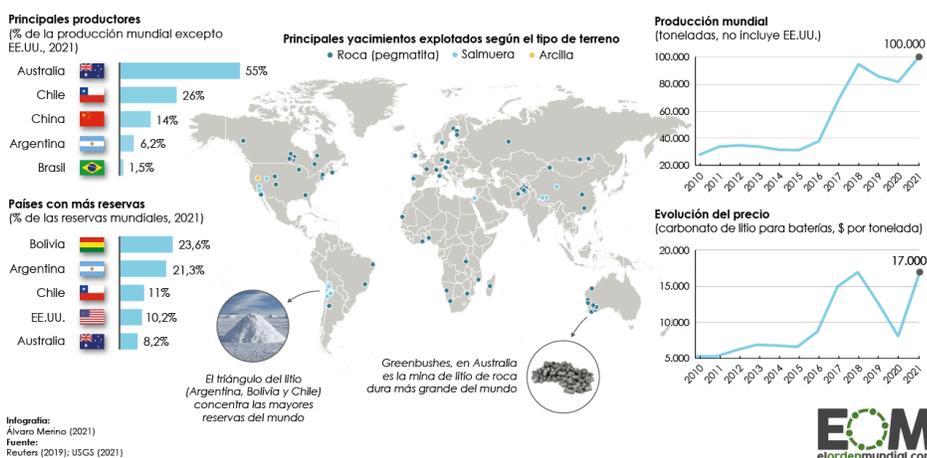
Los depósitos de pegmatita que contiene litio están dispersos geográficamente, con grandes depósitos ubicados en Greenbushes en Australia, ManonoKitolo en República Democrática del Congo y Jiakika en China; se estima que esos depósitos tienen recursos similares a solo un depósito de salmuera (Narins, 2017). Ya los grandes depósitos de litio en salmuera se encuentran en sur américa, con países como Bolivia, Chile y Argentina, en menor concentración en norte América en Estados Unidos y la meseta tibetana como se puede visualizar en la figura 14.

Se ha propuesto la idea de crear una OPEP de litio para que la integren países como Argentina, Chile y Bolivia, ya que poseen cerca del 85% de las reservas globales de este mineral, (Bolivia posee 50%, albergados en el salar de Uyuni y Chile cuenta con un 25 % en el Salar de

Atacama) de estos tres países, el que lidera el mercado es Chile con un 44% de comercialización, al vender 12.000 ton por año, mucho más que Australia (25 %), China (13 %) y Argentina (11 %). Al crear la OPEP estos países sur americanos podrían convertirse en reguladores de precios como los grandes productores de petróleo; de hecho el gobierno Boliviano no quiere convertirse en solo un exportador de materia prima, si no de productos industrializados (Noticia, 2011).

Figura 14

Litio el oro blanco, yacimientos y explotaciones



Fuente: (Merino, 2021).

Nota. Distribución de las reservas de Litio a nivel mundial.

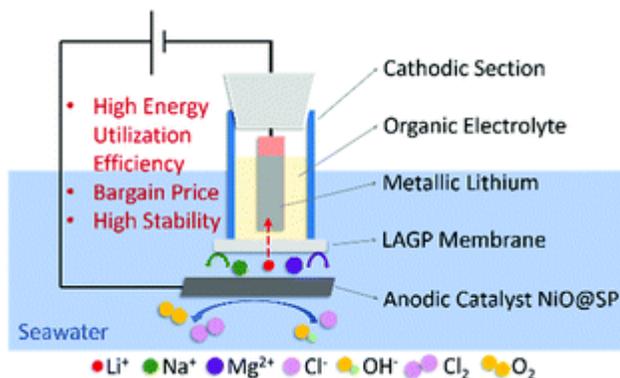
Se estima que el recurso mundial de litio es de aproximadamente 39 Mt (millones de toneladas), mientras que el escenario de mayor demanda no supera los 20 Mt para el período 2010 a 2100; por lo tanto, los recursos de litio son suficientes para sustentar la demanda hasta al menos el final de este siglo.

Las reservas de litio en el agua de mar son decenas de miles de veces más altas que en la tierra; la extracción se basa en una técnica de electrólisis con energía solar, utilizando electrolito en estado sólido $Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3$, catalizador de ánodo y una membrana selectiva

(LAGP) formando un catalizador de óxidos de metales de transición. Siendo un candidato prometedor para los recursos de litio (Zhang et al., 2020). Su funcionamiento se puede observar en la figura 15.

Figura 15.

Catalizador anódico de óxidos metales de transición para la extracción de litio del agua de mar.



Fuente: (Zhang et al., 2020).

Nota. Se observan el funcionamiento y las partes de un catalizador anódico utilizado para la extracción de litio del mar.

Fabricación de baterías

Entradas: materiales activos, aglutinantes, energía eléctrica

El cátodo se compone principalmente de aglutinante orgánico (fluoruro de polivinilideno (PVDF), papel de aluminio y materiales catódicos, como LiCoO₂, LiMn₂O₄, LiFePO₄, etc, mientras que el ánodo se compone principalmente de lámina de cobre, materiales orgánicos, aglutinantes y anódicos con grafito; el electrolito está compuesto principalmente por algunos solventes orgánicos y sales de litio como LiPF₆, LiBF₄. Como resultado, la composición de LIB es relativamente compleja y contiene metales valiosos, lo que hace que se les llame una "mina de metal" de alto grado.

Producción de Electroodos. Todos los fabricantes tienen sus propias formulas y procesos para producir electroodos. Esta fase es de las más importantes, ya que de los electroodos depende las propiedades de la celda como voltaje, capacidad, estabilidad, comportamiento del ciclo y envejecimiento de la misma.

Uno de los primeros pasos es la mezcla de los materiales activos, dando como resultado una masa de recubrimiento. Luego se le une agentes conductores, como carbón negro con aglutinantes (PVDF), creando una mezcla como una papilla, la cual es sometida a una etapa de secado, donde se utilizan técnicas que pueden ser de baja o alta energía. El siguiente paso es húmedo, donde la parte seca es mezclada con el disolvente para los aglutinantes y para los adictivos formando la lechada. Al terminar este paso es posible que la suspensión siga aglomerada, entonces se debe utilizar herramientas de agitación y/o técnicas de mezclado (Pettinger et al., 2018).

Se pueden utilizar diferentes técnicas de mezclado, temperaturas y dosificaciones, pero se debe tener cuidado, ya que los errores de mezcla son irreversibles; los componentes individuales deben dosificarse con mucha precisión y ser lo más puros posibles. La función de los adictivos es aumentar a conductividad y la de los agentes aglutinantes es asegurar una estructura de electroodos cohesivo y la adhesión de la suspensión.

Teniendo la mezcla lista, se recubre los ánodos y cátodos, que de base tienen estructura metálica delgada: Los primeros son hechos con una lámina de cobre de espesor de 6 a 15 μm y los cátodos tiene papel de aluminio que tiene un grosor de 15 a 25 μm . La capacidad de la celda está dada por el grosor del revestimiento de material activo (Pettinger et al., 2018).

Para el recubrimiento de la lámina metálica se utilizan diferentes procedimientos, como lo son recubrimiento con hoja doctora, con troquel ranurado y con rodillo inverso. La corrida y la

tensión de las bandas de precisión óptica son esenciales para obtener buenos resultados. Después del recubrimiento se secan las láminas para lo cual se utilizan chorros de aire y/o diferentes tipos de secadores. De la temperatura de este proceso depende la adherencia de la mezcla en lamina. Los sobrantes expulsados durante el secado son añadidos nuevamente a la mezcla. Luego se puede llevar a cabo un proceso llamado calandrado el cual por medio de rodillos superiores e inferiores se reduce el espesor y mejora la compactación del material activo en la lámina.

Producción de Ánodos. Entradas: Energía eléctrica, materia prima (carbón, petróleo, grafito natural). Las celdas inicialmente tenían una hoja de litio metálica como ánodo, esto daba un voltaje muy alto, pero la eficiencia del ciclo disminuía a medida que el litio se disolvía repetidamente en el proceso de carga y descarga. Esto significaba que se debía usar dos o tres veces la cantidad normal de litio; por tal motivo, el litio metálico se reemplazó por el material llamado de intercalación, que por lo general es carbono o grafito, en el caso del primero, es un proceso reversible y sin pérdidas, y el recubrimiento de litio no se produce, en el caso del grafito o de carbonos amorfos, aportan una mejor capacidad de corriente y son más seguros y estables en combinación con nuevos electrolitos y materiales catódicos; de hecho los carbonos amorfos su capacidad de almacenar litio es superior a la del grafito por el uso de metales y aleaciones que reaccionan de manera reversible con el litio.

Sin embargo, estos sistemas que utilizan metal, aún no se producen en masa y requieren de más investigación, al igual que con el titanato de litio y el óxido de titanio, que son prometedores como materiales activos de ánodo para mejorar la estabilidad del ciclo y cumplir con los requisitos de seguridad y potencia extraordinariamente alta, ya que son materiales que tienen una capacidad específica muy baja y su potencial frente al litio es muy alto.

Las características electroquímicas de los materiales son muy importantes al igual que la adhesión sobre laminas metálicas en la producción de electrodos.

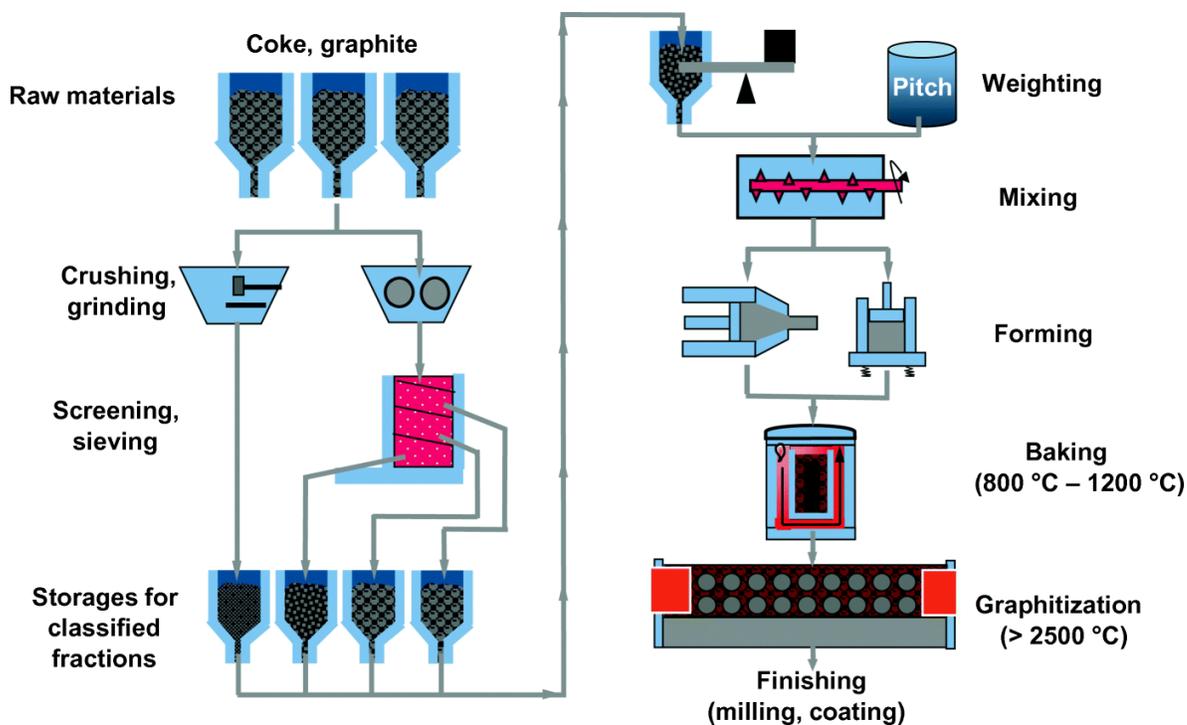
Producción de Carbonos Amorfos y Grafito. Los carbonos amorfos al igual que el grafito se da de manera natural y es posible la realización sintética de ambos. Un representante del carbono amorfo natural es la antracita, en el caso del grafito natural, si lleva el mismo nombre. Para utilizar el grafito natural en las baterías se debe separar de la materia prima y puede ser purificado químicamente, térmicamente o ambos.

Ya para el caso de los carbonos amorfos o para el grafito sintético suele utilizarse subproductos de la industria del carbono o petróleo siendo los más comunes el coque de petróleo, resinas con alto contenido de compuestos aromáticos, por ejemplo, resinas fenólicas, en la industria del carbón son comunes a brea de alquitrán de hulla y el coque altamente isotrópico. Estos materiales se carbonizan o calcinan a temperaturas $800^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$ si el material (resina de furano o resina fenólica) permanece amorfo durante el tratamiento térmico posterior hasta los 3.000°C , se denomina carbón duro o no grafitizable por el contrario si el material (coque o brea) se transforma en grafito por encima de los 2500°C , se denomina carbono blando o grafitizable (Wurm et al., 2018).

Los materiales solidos calcinados son pre procesados (molidos, tamizados, cribados y clasificados), luego se mezcla con aglutinante liquido fundido como puede ser la brea para producir una masa verde plastificada para ser moldeada por extrusión o por compresión. Después el cuerpo verde se somete a temperaturas $800^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$ en ausencia de oxígeno, ahí la brea se carboniza dando lugar al carbón amorfo. Ya para obtener grafito el cuerpo se somete a 2500°C , podemos visualizar el proceso de 2500°C , generación de grafito en la figura 16.

Figura 16.

Generación de grafito



Fuente: (Wurm et al., 2018).

Nota. Se visualiza el proceso para generar grafito a partir de coke.

Intercalación de Litio en Grafito y Carbonos Amorfos. La intercalación electroquímica del litio en el grafito se produce dentro de un rango de potencial 0 a 0,25 V frente a Li/Li^+ . Este proceso se lleva a cabo guiándose por diferentes mesetas, con dos fases que existen simultáneamente a lo largo de ellas, las cuales están definidas con compuestos químicos bien precisos al principio y al final de cada una. El proceso de intercalación es medible y discernible por su color.

Las estructuras de grafito hexagonal (ABABAB) y romboédrica (ABCABC), respectivamente, se transforman en una secuencia de AAAAAA con litio intercalado durante la

intercalación. La posición del litio está en el centro de los anillos C₆ entre dos capas de grafeno la capacidad del grafito depende del número de capas de grafeno disponibles. Es casi posible lograr la capacidad específica reversible teórica de 372 mAh/g en la práctica, si se utiliza un grafito muy bien estructurado (por ejemplo, grafito natural) y tasas de carga lentas (corrientes bajas) (Wurm et al., 2018).

En el primer ciclo hay una diferencia entre la carga y la descarga, la pérdida de capacidad se debe a las reacciones electroquímicas entre los iones de litio del cátodo, los componentes del electrolito (carbonatos orgánicos, aditivos, etc.) y la superficie del ánodo. Esto da como resultado una capa entre el electrolito y las partículas de grafito, la cual se llama SEI (interfase de electrolito sólido). La calidad del SEI influye en la estabilidad del ciclo útil, la potencia y la seguridad de las celdas de iones de litio; por tanto, este debe ostentar la mejor conductividad de iones de litio posible para lograr la sobretensión más baja posible.

En el caso de los carbonos amorfos no tiene un orden de largo alcance consistente como el grafito, el área ordenada es pequeñas y las distancias de las capas locales varían, al igual que distintas áreas dentro del material con grupos de vacantes heteroátomos y grupos funcionales (p. ej., –COOH, –OH). Estos factores dan como resultado características electroquímicas considerablemente diferentes.

La intercalación de litio sucede más o menos continuamente a diferencia del grafito, que ocurre en etapas definidas y la pérdida de capacidad durante el primer ciclo de carga es extremadamente alta, la cual es causada por una fuerte reacción con defectos superficiales con heteroátomos y grupos funcionales en las superficies internas y externas.

Lo más importante para el colector es recolectar electrones mientras permanece electroquímicamente estable; por esa razón en la lámina se utiliza cobre que aporta la más alta

conductividad eléctrica en comparación de todos los materiales metálicos, (después de la plata) con 58 MS/m y tiene buena resistencia a la corrosión. Adicional se debe garantizar una buena adherencia del material al ánodo, que sea resistente para que aguante la fabricación y a la vez que se ha delgada para que sea más rentable, el espesor de la lámina de cobre que se utiliza en este momento es de 10 μm (Wurm et al., 2018).

Electrolitos y Sales. Entradas: materia prima, energía eléctrica. Los electrolitos constan de 3 materiales principalmente: Sales conductoras, disolventes apróticos orgánicos o polímeros y adictivos. Los disolventes deben ser capaces de disolver sales de litio en concentraciones altas, deben tener una viscosidad baja para permitir un transporte de iones sin obstáculos, deben ser inertes frente a todos los demás componentes de la celda en todas las condiciones de operación, especialmente frente a los materiales del electrodo cargado y el colector de corriente, deben manejar punto de fusión (T_m) bajo y un punto de ebullición (T_b) lo más alto posible.

Hay dos clases de solvente orgánicos que se han utilizado como materiales adecuados por ser simultáneamente apróticos y altamente polares: éteres y ésteres, incluidos los carbonatos orgánicos. Los electrolitos que contienen éter exhiben en su mayor parte una baja viscosidad y por lo tanto una muy alta conductividad, pero su estabilidad electroquímica está restringida, por eso con la introducción de los óxidos de metales de transición de 4 V como materiales de electrodos positivos, los éteres han desaparecido como disolventes para las baterías de iones de litio de alta energía.

Los ésteres, especialmente los diésteres orgánicos de ácido carboxílico se utilizan en la actual técnica; por lo general, se emplean mezclas de carbonatos cíclicos y carbonatos de cadena abierta.

El electrolito también lleva sales conductoras, las cuales se han utilizado en baterías ion litio desde finales de los años sesenta; desde allí el proceso de producción, la calidad y la pureza, cruciales para el rendimiento de una batería, se han mejorado a lo largo de los años. Las sales deben aportar máxima solubilidad y completa disociación en solventes apróticos para asegurar una alta movilidad de los iones de litio, al igual alta estabilidad aniónica electroquímica, especialmente con respecto a la oxidación, además de una alta estabilidad química con respecto al solvente.

La mayoría de las baterías ion litio que se usan hoy en día llevan Hexafluorofosfato Lipf como sal conductora; desde finales de los años sesenta se ha usado como sal conductora, al presentar estabilidad química y térmica, aportando una conductividad de 8 a 12 mS/cm, forma electrolitos altamente conductivos en mezclas de carbonatos orgánicos. Estos electrolitos son, además, electroquímicamente estables hasta casi 5 V frente a Li/Li^+ .

Adicional a lo anterior es de las pocas sales que previene de forma muy eficaz, la corrosión del colector de corriente de aluminio del electrodo positivo a potenciales superiores a 3 V frente a Li/Li^+ .

Para prevenir accidentes por sobrecarga se emplean adictivos como bifenilo y ciclohexilbenceno en electrolitos. Estos aditivos son inertes en condiciones normales de funcionamiento de las celdas de iones de litio; sin embargo, se activan electroquímicamente cuando el voltaje de la celda alcanza un valor crítico, por eso se implementan enfoques constructivos, por ejemplo, válvulas de seguridad y refrigeración activa.

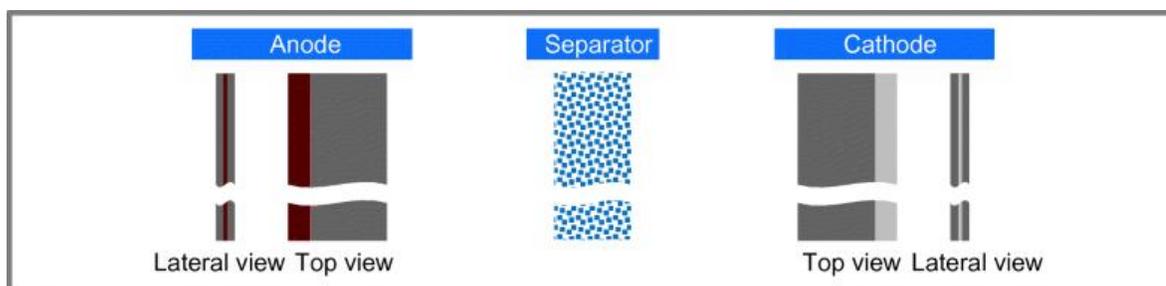
Si se utilizan electrolitos poliméricos estos reemplazan el separador y el electrolito líquido, por tal motivo, deben manejar conductividad similar a la de los electrolitos líquidos, estabilidad mecánica y electroquímica. Hay dos tipos diferentes de compuestos: Uno de ellos son

los electrolitos poliméricos estándar que se emplean de forma similar en las pilas de combustible; el otro son los materiales híbridos, que contienen solventes adicionales y aditivos gelificantes (Hartnig & Schmidt, 2018).

Montaje de Celdas. Entradas: láminas de cobre, láminas de aluminio, Energía eléctrica. El primer paso es cortar longitudinalmente las bobinas del cátodo y el ánodo. Se cortan en rollos, ancho estándar de los rollos maestros es de alrededor de 600mm, para este proceso se utilizan maquinas cortadoras con cuchillas o laser con velocidades de más de 100m/min. Luego se enrollan nuevamente para continuar con la siguiente fase del ensamblaje que se da en una habitación seca con una temperatura de rocío de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos. Después se procede a la decolación y el apilamiento, aquí se producen las láminas individuales de ánodo y cátodo de igual manera la separación, la cual se puede dar en una línea de montaje o mediante el almacenamiento provisional de varias hojas en forma de revista.

Para los cortes se pueden utilizar diferentes tecnologías tales como corte por láser, corte rotativo, corte por troquelado y por punzones; para el apilamiento se debe tener las hojas individuales de cátodo y ánodo, así como la lámina separadora y se pueden utilizar dos procesos diferentes: plegado en z y apilamiento de una sola hoja; el primero consiste en insertar las láminas individuales de Ánodo y Cátodo en la red separadora en forma de z; el segundo que es el apilamiento de una sola hoja, consiste en desclasificar el separador y las hojas resultantes se apilan en alternancia con las hojas de cátodo y ánodo

Después se realiza limpieza donde se busca eliminar partículas de los bordes de las láminas de los electrodos, ya que pueden ocasionar daños en el separador y provocar un cortocircuito.(Pettinger et al., 2018)

Figura 17.*Montaje de celdas.*

Fuente: (Pettinger et al., 2018).

Nota. Las celdas están constituidas principalmente por el ánodo, el separador y cátodo.

Impacto Ambiental

Los vehículos eléctricos en sí, no generan emisiones, pero la producción de baterías si genera carga ambiental, en algunos estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) los impactos ambientales se analizan utilizando indicadores de punto medio, encontrando que el potencial de contribución al calentamiento global del paquete de baterías de 26,6 KW/h- 253Kg equivale a 4,6 toneladas de dióxido.

Los impactos generados en la fabricación de baterías (de la cuna a la puerta), son causados principalmente en las cadenas de producción de celdas y de las pastas de electrodo positivo y negativo. Estos tres procesos representan entre el 56 y 86 % del impacto total generado por la batería, teniendo como causa principal, la procedencia de la electricidad utilizada en el proceso. Colocando así, al proceso de manufactura, como el de mayor impacto.

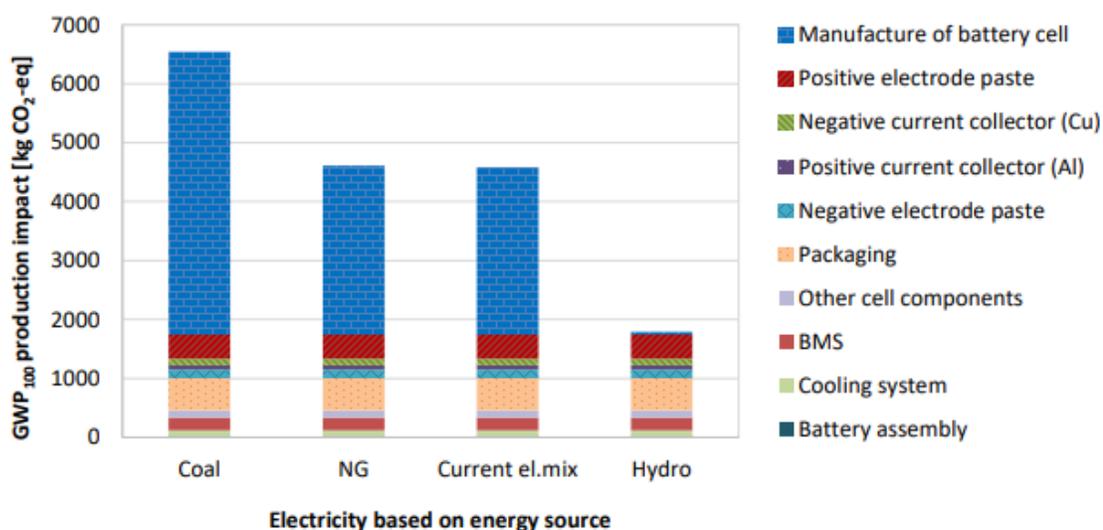
De adonde proviene la energía utilizada para recargar la batería influye en el grado de participación en el calentamiento global que puede llegar a tener el mercado de los vehículos eléctricos. En China dos tercios de la energía eléctrica se produce a base de carbón; por tanto, el

impacto es mayor durante el uso de los vehículos, quedando en desventaja en comparación de países como Noruega que es la sexta productora de hidroeléctricas del mundo.

En la figura 18, se puede visualizar que la producción de CO^2 generado es mayor en las diferentes etapas del proceso de fabricación de la batería al utilizar como fuente de energía el carbón y una disminución del 60% al utilizar electricidades provenientes de hidroeléctricas.

Figura 18

Potencial de calentamiento global según el tipo de energía en la fabricación de la batería.



Fuente: (Ellingsen et al., 2014).

Nota. Se puede observar y analizar la producción de CO^2 por las diferentes etapas que constituyen la fabricación de baterías, utilizando electricidad de diferente procedencia, como: carbón, gas natural, mix e hidroeléctricas.

Si se rastrea la providencia de la fuente del impacto en las cadenas de producción, se encuentra que la combustión de carbón y gas natural en las centrales eléctricas, donde se obtiene la energía necesaria para la fabricación de las celdas de batería, significa el 51% de participación en el calentamiento global GWP del total de la batería. El proceso de extracción de carbón y gas natural supone el 32% del potencial de agotamiento fósil total (FDP). El gas natural, el uranio y

el petróleo crudo que se utilizan para satisfacer las necesidades energéticas de la producción contribuyen al 31% del potencial de agotamiento total del ozono (ODP). Los impactos de la pasta de electrodo positivo al uso de sulfato de níquel y el manganeso causa el 86% del potencial de agotamiento del metal (MDP). El cobre utilizado en el colector de corriente negativa puede provocar indirectamente el 62% del potencial de Eutrofización de agua dulce (FEP), 65% de ecotoxicidad en agua dulce y un 54% en agua marinas (METP); por último, puede representar un 53% de potencial de toxicidad humana (HTP). La dimetilamina usada en el solvente contribuye al 75% del total de la batería en el potencial de eutrofización marina (MEP) (Ellingsen et al., 2014).

Con estos procesos se generan varios impactos ambientales a la atmosfera, con gases salientes de la re compresión de la roca y algunas veces con los gases producto de las voladuras, a la altura superficial se emiten partículas, a niveles bajos de emisión por la manipulación del carbón o por la acción del viento sobre las pilas de materiales acumulados. Al recurso hídrico se generan impactos como: contaminación química, alteración de los cursos de los cauces, aumento de turbidez, sólidos en suspensión y disueltos. Al recurso suelo se presenta impactos como: cambios paisajísticos, descubrimiento de suelos, que incluye deforestación para obtención de madera para hacer palancas utilizadas en labores de sostenimiento, depresión en el terreno que afectan abruptamente la topografía, cuando la explotación es a poca profundidad; en cambio, las excavaciones profundas causan hundimientos a largo plazo y de contorno suave denominados subsidencia; estos hundimientos pueden ocasionar daños a las obras civiles y edificaciones.

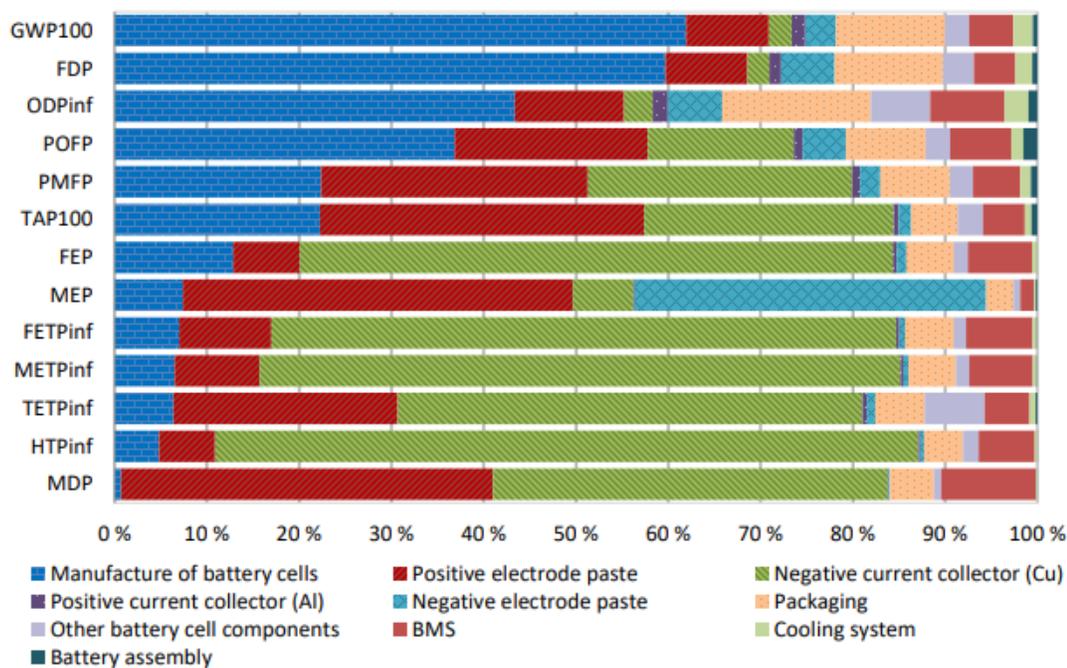
En la extracción de litio de espodumeno o salares de altura se utiliza millones de litros de agua y se genera grandes cantidades de desechos, a la vez que la presencia de personal y maquinaria puede perturbar a la fauna de la región y representa un riesgo de salinización del

agua dulce; que es sustento de comunidades aledañas, en su mayoría indígenas; de las cuales cabe rescatar que evitan la extracción incontrolada de la sal (Bravo, 2019).

El porcentaje de participación de otros impactos generados en las diferentes fases de la producción de las baterías según categoría, se pueden visualizar y analizar en la figura 19.

Figura 19.

Impactos de la cuna a la puerta por categoría



Fuente: (Ellingsen et al., 2014).

Nota. Se puede apreciar el porcentaje de participación en impactos ambientales, generados por cada una de las etapas que conforman la fabricación de las baterías.

Por lo anterior lo que definirá el éxito de la transición energética en el parque automotor, desde el punto de vista ambiental será cuan limpia es la red eléctrica, tanto la electricidad que se usa para su funcionamiento (recarga de baterías) como la utilizada para la fabricación de cada uno de los componentes del vehículo.

De hecho se podría hablar de nuevos modelos de baterías más potentes y ecológicos, basados en virus, algas, oxígeno o el agua proveniente de una central geotermal, por ejemplo, los estudios que buscan crear baterías biodegradables basadas en algas de playa (*Cladophora*) o celulosa, llegan a las conclusiones que al implementarlas se evitaría la contaminación generada por las baterías convencionales que están hechas de metales, se reduciría el costo de fabricación y serían mucho más livianas. (Noticia, 2010)

Los estudios dedicados a la evaluación del desempeño ambiental de las baterías actuales pueden llegar a varias conclusiones, todo depende de la cantidad de ciclos o la distancia recorrida por el vehículo, por ejemplo, para una batería de 3000 ciclos acompañada de una eficiencia del vehículo de 0,5 MJ por Km da como resultado $11g CO_2 eq * km^{-1}$. De otra manera es fundamental mantener por el máximo tiempo posible en uso la batería para así no aumentar el porcentaje de participación en los impactos ambientales, que tienen lugar en el proceso de extracción y manufactura.

Capítulo 3 Procesos de Reciclaje y Reutilización de Componentes

Debido a la transición energética la venta de automóviles eléctricos ha ido en aumento, para el año 2017 se registró por primera vez, ventas que superaron el millón de vehículos por año. A partir de este resultado suponiendo que una batería pese 250kg con un volumen de metro y medio cúbico ($0.5 m^3$), que es el promedio de una batería de Ion Litio, se tendrían cerca de 250.000 mil toneladas y medio millón de metros cúbicos de residuos al finalizar de su vida útil.

Por lo anterior, tener una buena gestión de estos residuos generados por la batería al finalizar su vida útil representa varios desafíos, desde el almacenamiento de las baterías antes de la reutilización o disposición final, hasta los procesos de separación química que conlleva el reciclaje; que pueden resultar realmente costosos, ya que se tiene que desmontar la batería, triturarla y realizar algún proceso de reciclaje para obtener algunos dólares (HUGHES, 2020). Sin embargo, es fundamental llevarlo a cabo porque se debe recuperar materia prima para que no se tenga que extraer nuevamente, acelerando el agotamiento de las reservas y causando impactos negativos al ambiente, lo cual iría un poco en contra vía con el propósito inicial de reemplazar combustibles fósiles para disminuir las emisiones de efecto invernadero.

Algunos de los metales utilizados en la fabricación de las baterías como es el caso del Litio debido a su baja adsorción se puede lixiviar de manera simple a los acuíferos, tanto así que sea encontrado en pequeñas cantidades en varias especies de peces. En los seres humanos puede ocasionar intoxicaciones ocasionando fallas respiratorias, problemas del miocardio y edemas pulmonares (Díaz & Arias, 2004).

Desde otra perspectiva en el proceso de almacenamiento y disposición final se puede presentar peligros debido a que los materiales que las constituyen pueden llegar a ser reactivos

de hecho un poco más que el caucho de neumático, ocasionando incendios, los cuales se han venido presentando en aumento en las instalaciones de recuperación de metales.

Los materiales actuales recuperados por medio de los métodos de reciclaje y que cuenten con alta pureza, son utilizados para re-sintetizar los materiales del cátodo original, también son utilizados para síntesis de $CoFe_2O_4$ o $MnCo_2O_4$

Reciclaje

Formas de Reciclaje

Antes de realizar el proceso de reciclaje se suele llevar a cabo actividades de preparación, algunas combinadas entre sí, todo depende de la capacidad de las instalaciones donde se lleve el proceso y si es a escala industrial. Entre las más destacadas encontramos:

Desactivación de batería: Las celdas que llegan para desmonte por lo general contienen energía residual, por tanto, es fundamental realizar como paso previo la desactivación, con el fin de prevenir la liberación rápida de esta energía eléctrica, la cual puede provocar sobrecalentamiento de la zona, incendios o hasta una explosión. Si llegase a suceder lo anterior se pondría en riesgo parte de la infraestructura de la batería y los metales que se reciclarían posteriormente (Yu et al., 2021).

Desmantelación y Separación: Las baterías pueden ser desmanteladas manualmente en componentes como estructura plástica, metálica, lamina de ánodo y cátodo; aunque hoy en día se usa más la separación magnética para separar las piezas metálicas. También se usa la separación por gravedad, es un método basado en la diferencia de densidad entre los diferentes componentes, se utiliza principalmente para separar las piezas de baja densidad como lo pueden ser el separador, los plásticos y la lámina de aluminio, pero también para dividir los electrodos negativos y positivos, ya que también tienen una gran diferencia de densidad entre ellos. El

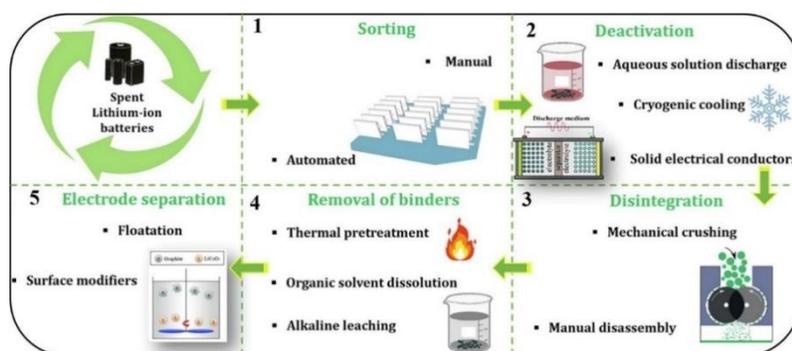
proceso de separación por gravedad se puede lograr a través de un agitador, mesas, cribas vibratorias, un fluido de densidad intermedia o separación por aire.

Después se tiene la separación del material del cátodo y del colector de corriente, este proceso puede llegar a ser un poco difícil, debido a que el material del cátodo se adhiere al colector por medio de los aglutinantes como el PVDF que genera una fuerte unión, en cambio con el ánodo no ocurre lo mismo, se puede separar más fácilmente de las láminas de cobre utilizando métodos mecánicos. (Yu et al., 2021)

Si se utiliza el proceso de trituración, se tiene la mezcla de materiales provenientes del ánodo y cátodo; por lo cual, la separación es algo compleja, ya que las tecnologías existentes como la separación por gravedad no distinguen el grafito en partículas finas. Sin embargo, después de muchos estudios se determinó que la superficie de material del cátodo es hidrofílica con mínima flotabilidad, en cambio el grafito cuenta con buena hidrofobicidad y flotabilidad (Yu et al., 2021).

Figura 20.

Pretratamiento para una batería en proceso de reciclaje.



Fuente: (Yu et al., 2021)

Nota. La figura muestra 5 pasos que se pueden llevar a cabo dentro del proceso de pretratamiento. Se pueden utilizar todos o solo algunos de ellos, dependiendo del método de reciclaje que se vaya a utilizar.

Pirometalúrgica o Fundición. Es un método de operación simple por eso juega un papel importante en el proceso de reciclaje de residuos de baterías. En este proceso se utiliza un horno que funciona a altas temperaturas donde la batería se derrite en su totalidad, debido a que se pueden introducir los módulos completos sin necesidad de un paso previo de desmantelación; sin embargo, el proceso no tiene en cuenta la recuperación de los electrolitos, ni del plástico que representa entre un 40 y 50 % del peso de la batería, ni las sales de litio, pero al quemar estos compuestos se genera un proceso exotérmico liberando energía que puede ser utilizada en el mismo proceso, reduciendo así la demanda de energía.

Dentro del horno se forma una aleación de metales, escoria (sustancia vítrea formada por impurezas) y gases, cada una de ellas, se da a diferentes temperaturas y generan diferentes productos: A temperaturas menores a 150 se generan productos gaseosos que comprenden compuestos orgánicos volátiles provenientes del electrolito y algunos aglutinantes; a temperaturas más altas se queman los polímeros y se da la aleación de metales incluido el aluminio incluido en las láminas de los electrodos, la cual se puede separar con procesos hidrometalúrgicos.

En procesos secundarios que buscan usar la batería como materia prima para producir otro tipo de productos como el acero, se encuentra la pirolisis, donde se evapora, separa y condensa el mercurio y el agua, a su vez, destruye los compuestos orgánicos y los emite como gases. Posterior a este proceso se da la reducción donde los residuos metálicos que quedan del proceso de pirolisis son tratados mediante un proceso de reducción a 1500 °C, usando como agente reductor el carbón que se origina en la pirolisis.

La tecnología de reducción carbotérmica que es utilizada ha atraído una amplia atención, ya que puede convertir LiCoO_2 en CoO y Li_2CO_3 ; luego, separar Li_2CO_3 a partir de CoO mediante lixiviación con agua.

Por último, se utiliza la reducción a fin de tomar los gases provenientes del proceso de pirólisis, para ser incinerados a temperaturas cerca de los $1000\text{ }^\circ\text{C}$ y posteriormente apagados para evitar la generación de dioxinas.

Esta el método conocido como reducción de tostado donde se facilita la recuperación de litio (Li). Se mezcla grafito con LiCoO_2 y es sometida a tostado de reducción a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ en una atmosfera libre de oxígeno durante 30min; el producto se somete a separación magnética humedad para recuperar Co, Li_2CO_3 y grafito. En el proceso se desintegra el esqueleto de oxígeno y permite que el Li se libere activamente del cristal del óxido de metal de transición de litio en forma de Li_2CO_3 , del mismo modo convierte LiNiCo y Mn_2O_3 en Li_2CO_3 , Ni, Co y MnO mediante tostado por reducción.

Por medio de inmersión se puede convertir Li_2CO_3 en LiHCO_3 más soluble, mejorando en gran medida la tasa de recuperación de litio. También hay estudios para recuperar Li en forma de LiCl agregando CaCl_2 para la tostación por cloración. Además, se elimina las emisiones de escape del proceso tradicional de tostado al sulfato mediante el control de la transferencia de azufre entre diferentes fases. Este proceso inicial se puede revisar en la figura 21 sector 1.

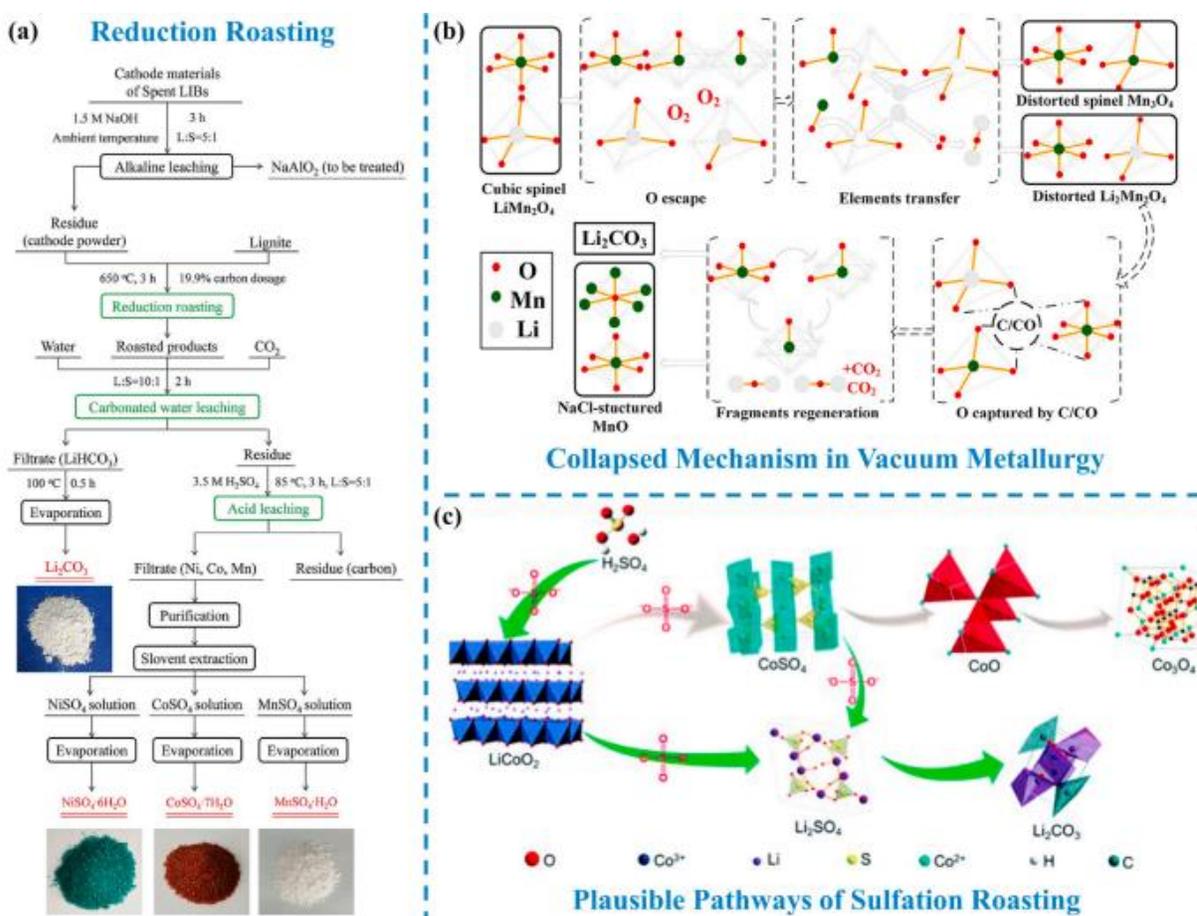
Luego, se usa el proceso metalúrgico para recuperar metales valiosos sin adictivos, este paso también permite el esqueleto de oxígeno y permite que el Li se libere activamente del cristal estructura del óxido de metal de transición de litio en forma de Li_2CO_3 como se evidencia en la figura 21 sector 2. El polvo de cátodo obtenido es envejecido con ácido sulfúrico y tostado sucesivamente al aire y vacío durante 60 min. El Li_2CO_3 de valor añadido se puede recuperar

como precursor del electrodo, por precipitación por inmersión en agua. Al mismo tiempo, a partir de los óxidos, se recuperan elementos de metales de transición (Co_3O_4) en el residuo del filtro como se muestra en la Fig. 21 en el sector c.

Este método está en investigación y continuo mejoramiento. las condiciones más estudiadas son atmósfera de gas y presión de tostado a alta temperatura.

Figura 21.

Proceso del método reducción de tostado para recuperar litio y metales



Fuente:(Jin et al., 2022).

Nota. Se puede comprender el método de tostado junto con dos procesos complementarios, por medio de los cuales se puede recuperar litio (Li_2CO_3) y otros metales de transición, como lo es el óxido cobaltoso cobáltico (Co_3O_4).

Llevar a cabo el proceso de Pirometalúrgica o Fundición presenta varias desventajas y/o desafíos por afrontar como los son los impactos ambientales provocados por la producción de gases tóxicos, los altos costos de energía, el postproceso hidrometalúrgico y un número ilimitado de metales recuperados entre ellos el cobalto, dejando perder una gran parte del material valioso entre ellos muchas veces el litio.

Hidrometalúrgica. A través de este proceso se busca lixiviar los metales con ayuda de agentes de lixiviación que incluyen: ácidos inorgánicos, como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico; ácidos orgánicos como el ácido oxálico y el ácido cítrico, también sustancias alcalinas como el sulfato de amonio. Luego con la solución lixiviada se puede tratar con un solvente orgánico. Ya cuando se tengan lixiviado los metales se procede a recuperarlos con reacciones de precipitación controladas con el PH de la solución, por ejemplo, el cobalto se saca como sulfato, oxalato, hidróxido o carbonato y el litio se puede sacar mediante una precipitación formando Li_2CO_3 o Li_3PO_4 (Harper et al., 2019).

En síntesis, el proceso consiste en disolver los residuos pretratados en soluciones ácidas y alcalinas, luego se extraen los metales mediante precipitación los cuales son extraídos por medio de solventes. Durante las diferentes etapas se debe tener en cuenta concentración de ácido de lixiviación, tiempo temperatura de la solución, adición de agentes reductores como lo es el peróxido de hidrógeno H_2O_2 para obtener $Co(II)$ soluble (HUGHES, 2020).

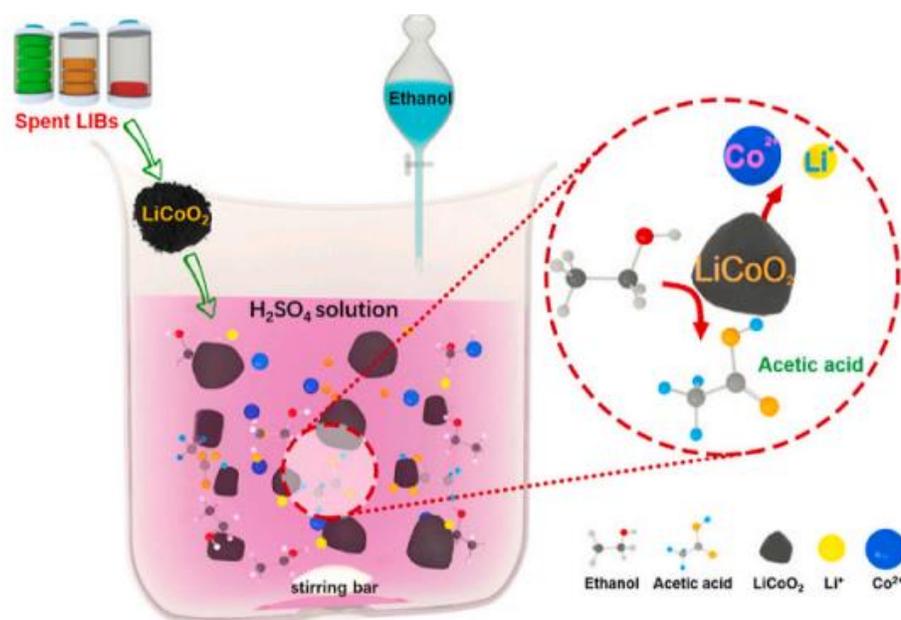
Los ácidos cumplen la función de destruir enlaces en el metal, por lo general las tecnologías hidrometalúrgicas casi industriales utilizan ácidos inorgánicos para la lixiviación de metales por su alta eficiencia; sin embargo, son propensos a generar gases tóxicos durante la lixiviación de metales, como Cl_2 , SO_3 , NO y los agentes reductores puede convertir los metales

en los iones metálicos divalentes correspondientes, haciéndolos más solubles en solución ácida. (Jin et al., 2022)

Inicialmente se usaban los ácidos inorgánicos como el HCl , HNO_3 , H_3PO_4 , estos últimos sin contar HCl generalmente se usan en presencia de reductores como el peróxido de hidrógeno, para otros ácidos se puede implementar etanol, por ejemplo, se puede usar para lixiviar $LiCoO_2$ en una solución de Ácido sulfúrico, como se puede apreciar en la figura 22. Al agregar 5% en volumen de etanol a 6 mol/L H_2SO_4 a 90 °C, la eficiencia de extracción de Co y Li es superior al 99%, debido a que el Etanol puede reducir el Co^{3+} a Co^{2+} , mientras que el etanol es oxidado a ácido acético (Jin et al., 2022).

Figura 22.

Proceso hidrometalúrgico donde se recupera cobalto y Litio



Fuente: (Jin et al., 2022).

Nota. La figura muestra que ingresa $LiCoO_2$ para lixiviar litio y cobalto a una solución de ácido sulfúrico H_2SO_4 , junto con Etanol, que es el agente reductor.

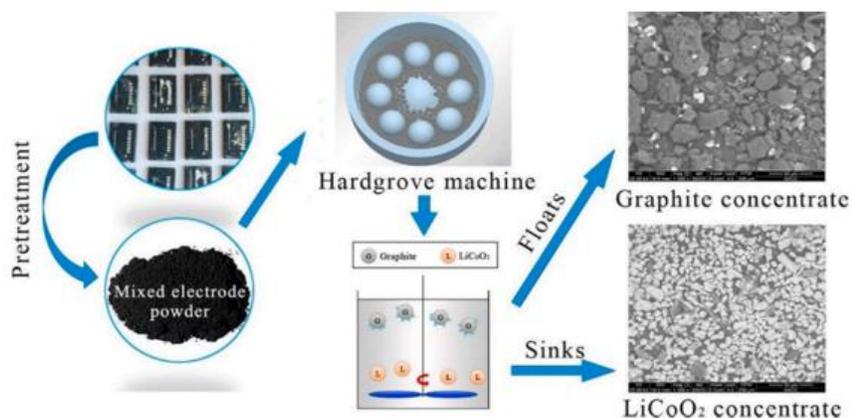
Es un método útil para la recuperación de materiales catódicos con un alto valor económico, que contienen gran cantidad de cobalto, óxido de cobalto y litio recuperando hasta un 70% del valor de estos cátodos (HUGHES, 2020), como desventaja se produce gran cantidad de residuos líquidos; por tal motivo, se requiere de un adecuado manejo y disposición.

Flotación. Es un método para procesar minerales, donde se utilizan las propiedades físicas y químicas de la superficie mineral para separar diferentes minerales, en especial los más finos, se lleva a cabo añadiendo los agentes involucrados en un vaso o tanque dependiendo la cantidad. Las partículas minerales hidrofóbicas se pueden unir a las burbujas y flotar a la superficie de la pulpa para formar una capa de espuma mineralizada, mientras que las partículas minerales hidrofílicas aún permanecen en la suspensión para lograr el propósito de separación de diferentes minerales. Así se puede apreciar en la figura 23, donde las superficies hidrofóbicas del grafito quedaron expuestas debido a la destrucción de su estructura laminar separándose del $LiCoO_2$, que por el contrario es hidrofílico y con poca flotabilidad.

Por lo anterior, el método se convierte en un proceso factible para separar materiales de electrodos positivos y negativos que tienen evidentes diferencias hidrofílicas e hidrofóbicas causadas por sus diferentes estructuras. Sin embargo, las partículas provenientes de estos electrodos vienen cubiertas de aglutinante como el PVDF y electrolito residual que reduce en gran medida la diferencia hidrofílica e hidrofóbica entre los materiales del cátodo y el ánodo, lo que puede llegar a interferir en la separación efectiva de las partículas por medio del método de flotación.

Figura 23

Flotación de molienda para la separación y recuperación de LiCoO_2 y grafito de LIB gastado.



Fuente: (Yu et al., 2021).

Nota. La figura muestra como después de colocar la molienda de electrodo en el tanque de flotación, el grafito pasa a la superficie por ser hidrofóbico y LiCoO_2 permanece en suspensión por ser hidrofílico.

Mecanoquímico. Este método se ha venido utilizando recientemente para la recuperación de metales. Consiste en que los materiales se trituran junto con cloro o un agente complejante para producir sales de cobalto que sean solubles en agua sin poderlas separar en fracciones insolubles por medio de lavados con agua (Harper et al., 2019).

Por lo general, es la trituración LiCoO_2 con cloruro de polivinilo (PVC) o etilendiaminotetraacético (EDTA) para convertir LiCoO_2 en cloruros de Li y Co, así el Li y el Co se pueden extraer por lixiviación con agua.

Reciclaje Directo. En el reciclaje directo, la remoción de estos materiales de sus respectivos electrodos es para reutilizarlo o incorporados en la manufactura de una batería (LIB) con cambios mínimos en su morfología, como sucede con el óxido de metal mixto, los cambios son mínimos en su morfología cristalina. Consiste en triturar la batería obteniendo una mezcla negra que es una mezcla de polvo proveniente del ánodo y cátodo. El polvo obtenido debe purificarse cuidadosamente para retirar residuos de pegante y polímeros sin dañar la superficie activa de los materiales, para ello se utiliza solvente o despolimerizando con calor.

No en todos los países se utiliza la trituración, en el reino Unido Junto con países del lejano oriente lo que están haciendo es dividir la batería en 3 (Ánodo, cátodo y el separador). El proyecto Recyclin of lithium Ion Batteries (ReLIB) de Faraday Institution está desarrollando un sistema automático de desmonte para así evitar descargas eléctricas a los técnicos que realizan el proceso de manera manual para separar las láminas metálicas de la superficie del material activo. Por otra parte, el equipo de investigación creó un método de delaminación mediante ultrasonidos, que separa los cátodos de los colectores de corriente logrando que sea 100 veces más rápido que usar ácidos.

Este método de reciclaje directo cuenta con la ventaja de poder recuperar casi todos los componentes de la batería, excluyendo los separadores, láminas de aluminio, cobre, sales del electrolito y grafito del ánodo; sin embargo, para mayor eficiencia se requieren diferentes procesos según los materiales del cátodo, y la batería no debe estar descargada o cuando los cátodos están litiados, debe estar en un estado óptimo.

Figura 24.*Reciclaje directo.*

Fuente: (HUGHES, 2020)

Nota. La figura representa de manera circular el proceso y las etapas que conforman el método de reciclaje directo, desde que sale la batería del vehículo hasta que se incorpora el litio recuperado al proceso de manufactura de una nueva batería. A partir de lo anterior se puede deducir la importancia que tiene el reciclaje en la economía circular.

Recuperación Biológica de Metales. En proceso se utilizan microorganismos que digieren óxidos metálicos que se encuentran en los cátodos de manera selectiva así producir nanopartículas metálicas. Es una metodología reciente en el reciclaje de LIB; por tanto, los estudios realizados no son numerosos, lo que supone un sin número de oportunidades de investigación en esta técnica.

El proceso de lixiviación depende del metabolismo de las baterías o microorganismos utilizados; por lo tanto, la eficiencia de los resultados es inestable, pero es un método que llama la atención por los bajos costos y baja contaminación.

Por lo general este método es utilizado para la recuperación de metales como el níquel y el cobalto que son difíciles de separar y requieren procesos posteriores con solventes, igualmente se implementado como complemento a los procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos(Harper et al., 2019).

Tabla 3.

Ventajas y desventajas de los procesos de reciclaje.

Métodos de reciclaje	Ventaja	Desventaja
Separación de partículas	Se puede separar los materiales negativos y positivos desde otras partes	En las fracciones fina puede ingresar cobre y aluminio por lo tanto el proceso de trituración debe estar bien controlado
Separación magnética	Las estructuras de acero o hierro (Fe) se puede separar fácilmente	Las estructuras pueden tener material activo
Separación por gravedad	Las partes de baja densidad como el separador y los plásticos pueden ser apartados	Mala separación de materiales por pequeñas diferencias de densidad
Flotación	Se puede separar los cátodos a bajo costo	Los materiales activos requieren ser más puro
Hidrometalúrgica	Alta eficiencia y pureza en la recuperación, poca contaminación y mínimo requerimiento de energía	Alto consumo de reactivos químicos; Pasos de procesamiento complicados; genera gran contenido de aguas residuales por tanto necesita más tratamiento de aguas residuales.
Pirometalúrgica	Operación simple, poder mezclar diferentes variedades de LIB sin clasificación previa	No se puede reciclar todos los metales, requiere de alto consumo energético y genera contaminación.
Bio metalúrgica	Bajo costo y alta seguridad, respetuoso con el ambiente	Largo tiempo de reacción e inestabilidad de la eficiencia.

Nota. La tabla 3 muestra una comparación de ventajas y desventajas entre los diferentes métodos de reciclaje utilizados para las baterías Ion litio.

Segundo Uso Para las Baterías

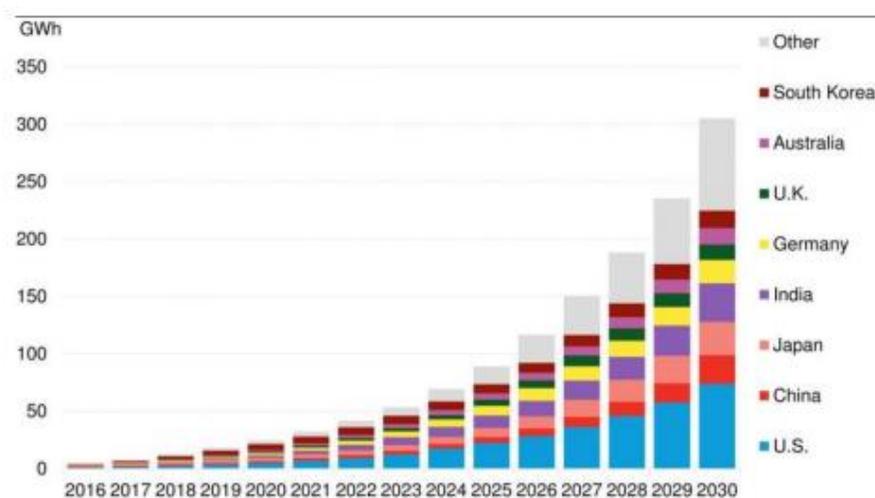
Cuando una batería de Ion litio termina su primera vida se debe retirar del vehículo (EV) en un lugar idóneo que lo permita, después se puede enviar a la fábrica para que la revisen y puedan dar un dictamen del estado de salud y/o si requiere de algún tipo de reparación para que pueda ser usada por segunda vez. El chequeo puede ser de dos formas, sin desmontar o desmontando para revisar cada módulo; en el primer caso es más rápido y más sencillo en comparación con el segundo, debido a que desmontando se manipulan los módulos o celdas, a la vez que se puede incluir un sistema de refrigeración y de control, de esta manera los tiempos se extienden. A este último se le llama también reutilización por método indirecto y se usa cuando la batería requiere reconfiguración y reensamblaje para adaptarse a las nuevas funciones y puede requerir hasta unas 39 horas (para híbridos enchufables) o 49 horas (para eléctricos).

Cuando la batería finalice su vida útil en el vehículo eléctrico(EV) está en condiciones de retener el 80% de la carga(HUGHES, 2020); por tanto, este tipo de baterías se pueden utilizar dándole un segundo uso en el comercio de almacenamiento de energía, el cual gira entorno de las energías renovables, en especial en sistemas fotovoltaicos, brindando la posibilidad de almacenar la energía generada durante horas picos por el sistema instalado y poderla utilizar en otro momento donde el sistema no esté produciendo suficiente energía, como lo es en las noches. Con el fin de que el hogar o sitio siempre tenga acceso a electricidad, estos sistemas off grid, son utilizados con gran frecuencia en zonas rurales o con difícil acceso a conexión a la red eléctrica para actividades agropecuarias y/o agroindustrias, sin embargo, también permiten un intercambio de energía con las redes eléctricas, con el fin de disminuir el costo del recibo(Hachim Campos, 2018).

Los países que en los últimos años han consumido más baterías son: Corea del Sur, Estados Unidos, Japón, Alemania y Australia; se espera que para 2030 la implementación de sistemas de almacenamiento a nivel global se duplique seis veces, con una inversión total de US\$ 103 mil millones ,(Cisterna Barros, 2019) como se puede visualizar en la figura 25.

Figura 25.

Implementación de sistemas de acumulación a nivel global.



Fuente: (Cisterna Barros, 2019)

Nota. La figura muestra el crecimiento que ha tenido el consumo de energía GWh en sistemas de almacenamiento (baterías) entre los países que más los utilizan. Desde el año 2016 hasta el 2022 y proyecta cómo será el crecimiento en los próximos años hasta el 2030.

La cantidad de baterías utilizadas en segundo uso dependerá del tamaño de los sistemas fotovoltaicos, por tanto, para el diseño e implementación se requiere de varios pasos, entre ellos, determinar el consumo de la vivienda o sitio, irradiancia solar, horas pico de sol y cantidad de módulos necesarios. El utilizar baterías reutilizadas baja significativamente el costo del sistema a instalar.

Uno de los sistemas de almacenamiento de baterías de segunda vida más grandes del mundo está ubicado en la ciudad de Lünen en Alemania, teniendo una capacidad de almacenamiento estacionario de 13MWh. Funciona de manera circular donde las baterías desechadas de los vehículos Smart de Daimler, son reutilizadas como unidades de almacenamiento en los mercados de la energía The Mobility House y GETEC, luego son recicladas por Remondis que es una de las empresas líderes en servicios, reciclaje y de agua del mundo.

Otro uso que se le dan a este tipo de baterías como segunda vida, es en sistemas de carga rápida de vehículos eléctricos: la alta densidad energética y capacidad restante después de la primera vida de las baterías li-ión, las hacen una alternativa llamativa para proporcionar altas cargas durante la recarga de los vehículos, si la gestión es por parte del fabricante facilita este tipo de reutilización

SEAT, con su proyecto Sunbatt, en colaboración con la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), el Institut de Recerca en Energía de Catalunya (IREC) y el Centre d'Investigació de Recursos i Consums Energètics (CIRCE), también está en la búsqueda de inventar nuevas aplicaciones para las baterías de segunda vida y así poder dar apertura a nuevos modelos de negocio.

A nivel general, el dar segundo uso a las baterías puede dar más tiempo a los gobiernos, para que el reciclaje sea mejorado y a mayor escala; en este tiempo se podría construir infraestructura para hacer frente a una mayor cantidad de LIBs usados, que, según las proyecciones realizadas, se espera haya un aumento significativo en los años que se avecinan.

Capítulo 4 Planes de Manejo y Gestión de Residuos Sólidos de Baterías Recargables Vehiculares de Ion Litio

Legislación y Planes de Gestión o de Manejo en Países Pioneros

Las empresas involucradas en el proceso de fabricación de las baterías están divididas en 3 grandes grupos: Los productores de celdas de iones de litio, que son empresas que realizan la primera fase de todo el proceso, lo que quiere decir que son las encargadas de crear celdas de iones de litio que luego pueden ensamblarse en módulos y paquetes. En este grupo destacan en el mercado las grandes empresas asiáticas, tales como Panasonic, LG Chem, CATL, las cuales tienen mega fábricas, con una capacidad de producción de más de 1 GWh de células al año (Cisterna Barros, 2019).

El segundo grupo son empresas que producen y venden BMS para iones de litio, ensambladores de baterías, también otros productores de sistemas auxiliares, que son empresas que producen y venden sistemas auxiliares para baterías de iones de litio, como carcasa, gestión térmica y electrónica de potencia. (Shafique et al., 2022)

La etapa de comercialización consiste en empresas que venden e instalan baterías. Algunas de estas empresas solo están especializadas en baterías para vehículos eléctricos como BYD, y otras especializadas en control estacionario o de potencia como BOSCH.

La etapa de reciclaje toma fuerza con algunas empresas como lo son UMICORE, la cual tiene domicilio en Bélgica, posee dos plantas de desmantelamiento de baterías, una en Alemania y otra en Estados Unidos y una planta de procesado de materiales en Bélgica (Ibáñez, 2012), es especialista en Fusión pirometalúrgica (con refinado hidrometalúrgico); BATREC ubicada en Suiza, dentro del proceso utiliza Granulación y tamizado (pretratamiento mecánico) y

pirometalurgia (con lixiviación); RECUPYL ubicada en Francia y Singapur, se centra en Granulación y tamizado (pretratamiento mecánico) , lixiviación hidrometalúrgica y refinó; TOXCO ubicada en Canadá utiliza métodos como Neutralización , tratamiento mecánico e hidrometalurgia.

De lo anterior se puede evidenciar que los métodos más maduros y solidos son los pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

Tabla 4.

Empresas involucradas en la cadena de valor de litio

Empresas involucradas en la cadena de valor del Ion litio en todo el mundo	
Productores de celdas de iones de litio	
- Custom Cells Itzehoe	- Electrovaya-Litarion
- Panasonic (Japan)	- CATL (China)
- Sony (Japan)	- Leclanché (Litarion)
- Toshiba (Japan)	- Saft (USA)
- EAS Germany	- SSL Energy
- Liacon	
Productores de sistemas de gestión de baterías	
-BMZ	-DENSO (Japan)
-CATL (China)	-Texas Instruments (USA)
-Fox BMS	-NEC (Japan)
-Elithion (USA)	-LG Chem (S. Korea)
-Lion Tec	-Panasonic (Japan)
-Navitas (USA)	-Samsung SDI (S. Korea)

-Presse	-Sony (Japan)
-Nuvation (USA)	-Lithium Balance (Denmark)
-Tescovolt	-BYD (China)
- Linear Technology (USA)	-Brill Power (UK)

Otros productores de sistemas auxiliares

-MAHLE	-ETI (Slovenia)
-Modine (USA)	-DANA (USA)
-SIBA	-SOC fuse (Japan)
-Mersen (France)	-Littelfuse (USA)
-ALLCELL (USA)	-Kingsbeece (UK)

Fabricantes de baterías

-Accusysteme Transwatt	-NEC (Japan)
-A123 Systems (China)	-Fronius (Austria)
-Aceleron (UK)	-HOPPECKE Batterien
- Ads-Tec	-Panasonic (Japan)
-BAK (China)	-Sonnenbatterie
-APS (UK)	-KOSTAL Solar Electric
-AKASOL	-Sony (Japan)
-BYD (China)	-Kokam (S. Korea)
-Denchi Power (UK)	-Leclanché
-AXXellon	-Toshiba (Japan)
-CALB (China)	-SSL Energy

-EasyLi (France)	- Liacon
-Be-Power	-EEMB (USA)
-CATL (China)	-LG Chem (S. Korea)
-SCLE SFE (France)	-SENEC
-BMZ	-Johnson Controls (USA)
-Lishen (China)	-Tescvlt
-Lithium Batteries (Australia)	-SMA Solar Technology
-Deutsche ACCUmotive	Saft (USA)
-Furukawa (Japan)	-Samsung SDI (S. Korea)
-Relectrify (Australia)	-Solarwatt
-E3/DC	-Tesla (USA)
-Hitachi (Japan)	-Varta Storage
-Northvolt (Sweden)	-Aceleron (UK)
-E-SpeicherWerk	

Vendedores/instaladores de baterías

-Accusysteme Transwatt	- BYD (China)
-Solar City (USA)	- Leclanché
-Ingeteam (Spain)	-ABB (Switzerland)
-Ads-Tec	-Varta Storage
-STEM (USA)	-Siemens
-Nissan (Japan)	-Daimler
-E-SpeicherWerk	-Bosch

-Tesla (USA)

Reciclaje de baterías

-Accurec

-SNAM (France)

- Umicore (Belgium)

-Sumitomo Metals (Japan)

-4R Energy (Japan)

-Glencore (Switzerland)

-Dowa Eco-System (Japan)

-CATL (China)

-INMETCO (USA)

Fuente: (Cisterna Barros, 2019).

Nota. La tabla 4 muestra las empresas involucradas a lo largo de la cadena de valor del Litio: (Producción, fabricación, comercialización y reciclaje).

Los fabricantes de vehículos muestran preocupación por los desechos generados por baterías y la contaminación que pueden generar al finalizar su vida útil que es aproximadamente a los 10 años o cerca de los 200.000 km; por tal motivo, como lo es General Motors y ABB están buscando nuevas utilidades a las baterías usadas en los vehículos volt, para que se puedan reutilizar hasta que ya haya perdido capacidad de carga y ya no sean útiles y deban ser recicladas, (Ibáñez, 2011). Otras como Toyota ya han venido seleccionando empresas de reciclaje para este tipo de residuos; en este caso seleccionaron a la empresa Umicore para que traten las baterías de los vehículos híbridos que emplean esta tecnología y que ya transitan por Europa (Ibáñez, 2012).

La innovación siempre ha sido parte fundamental para el Grupo Enel; este es el motor para el crecimiento y el desarrollo de los procesos, pues la compañía busca garantizar un suministro de energía acorde a la evolución tecnológica y a las necesidades de la civilización actual.

En la Unión Europea principalmente en Italia, la compañía Enel ha implementado programas de reutilización y reciclaje de baterías; enfocándose en creación de cadenas de producción especializadas utilizando nuevas tecnologías. Entre los proyectos más destacados están: un gemelo digital de la batería de iones de litio de última generación, la infraestructura de carga de alta potencia para vehículos eléctricos con el uso de baterías de segunda vida, un software de optimización para sistemas de almacenamiento independientes a gran escala y el reciclaje de baterías al final de su vida útil. (x, 2022)

En países como Catania y Roma, se encuentra ubicado El Storage X-Lab, que está dedicado a los sistemas de almacenamiento de energía. Este evalúa las tecnologías de almacenamiento de energía, mediante pruebas en los sistemas integrados en redes de baja y media tensión. Como proyecto de reutilización se encuentra Pioneer y se lleva a cabo en el aeropuerto de Fiumicino, el cual consiste en utilizar las baterías de segunda vida de los vehículos eléctricos para crear un sistema de almacenamiento de 10 MWh integrado con una planta solar de 30 MW(x, 2022).

Uno de los países productores de baterías Ion litio es China, sin embargo, los planes de gestión son de la última década, lo cual los hace bastante recientes; la gestión de residuos inicialmente estaban orientada a batería plomo Acido y Mercurio - Cadmio que eran las más usadas en el mercado(Sun et al., 2021). La evolución más significativa que ha tenido la legislación correspondiente a la separación, gestión y disposición de este tipo de residuos se puede visualizar en la tabla 5.

Tabla 5.*Legislación relacionada con los desechos de baterías en China*

Año	Leyes y regulaciones	Principios regulatorios para baterías
1995	Ley de la republica China sobre la prevención y el control de contaminación desechos solidos	baterías desechadas representan residuos sólidos peligrosos y deben reciclarse por separado
2001	Política técnica de prevención y control de la contaminación por residuos peligrosos	Retirar las baterías de cadmio y mercurio
2008	Lista de residuos peligrosos	Las baterías de plomo Acido son desechos sólidos peligrosos y deben tratarse por separado
2012	Medidas administrativas sobre recolección y aprovechamiento de residuos	Los fabricantes o importadores recaudar fondos
2015	Métodos para residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	Los residuos de LIB se agregaron oficialmente
2016	Política de tecnología para el reciclaje de baterías de energía	Reciclaje y reutilización de baterías de vehículos eléctricos de desecho
2016	Políticas de prevención de la contaminación de residuos de batería	Tecnologías de prevención y control de la contaminación de los residuos de LIB
2016	Plan de implementación de la responsabilidad del sistema productor	Implementar el plan de responsabilidad extendida por el sistema productor
2018	Las medidas provisionales para la gestión y recuperación de baterías de energía y utilización de vehículos a partir de nuevas energías	Los fabricantes de vehículos deben asumir la responsabilidad principal de recuperar la batería
2018	Disposiciones transitorias sobre la gestión	Plataforma de gestión integral para el

	de la trazabilidad de la energía	monitoreo nacional y la recuperación de baterías de energía
		Establecer la trazabilidad de la utilización de vehículos de nueva energía
2018	Aviso sobre el trabajo piloto de reciclaje de baterías provenientes de vehículos de nueva energía	Se confirman algunas regiones piloto y empresas para llevar a cabo el trabajo piloto del reciclaje de baterías
2020	Ley de la república popular sobre la prevención y control de la contaminación por residuos sólidos	Establecimiento de un sistema de registro de crédito para la prevención y control de residuos sólidos, incluidos residuos de LIB.
2020	Aviso sobre asuntos relacionados con la prohibición total de importación de residuos sólidos	Prohibida la importación de residuos sólidos de cualquier tipo.

Fuente: (Sun et al., 2021)

Nota. La tabla 5 indica de manera cronológica la creación y evolución de leyes y regulaciones relacionadas con residuos de baterías para China.

La política de técnicas de prevención de la contaminación por residuos de baterías, fue publicada por el ministerio de ecología y medio ambiente el 26 de diciembre; incluye la recolección, transporte, almacenamiento, utilización y disposición. Con esta legislación se reguló el control y la prevención de la contaminación con la implementación de ciclo cerrado, reciclaje verde, utilización de recursos, eliminación racional, segura y prioritaria, también se promovió el uso de las tecnologías de la información para realizar un sistema de supervisión al proceso de desecho.

El ciclo cerrado consiste en que la batería ya retirada debe utilizarse en cascada, primero aprovechar al máximo la capacidad de la batería antes de ingresar a la etapa de recuperación de materiales por medio del reciclaje. Esta etapa comprende la unión de varios métodos de reciclaje

creando un gran proceso industrial, inicialmente se debe garantizar el descargue de la batería a través de la conexión a una resistencia o inmersión en un solución salina, después de la trituración de residuos los LIB, la membrana orgánica y los plásticos se pueden separar por clasificación de aire, y luego, la capa metálica se recupera por separación magnética, los componentes restantes se pirolizan para eliminar la materia orgánica ligante PVDF y recuperar el electrolito generado durante el proceso de pirólisis (Sun et al., 2021).

Los gases tóxicos generados en el proceso de pirólisis, como el HF, pueden recibir un tratamiento adicional para reducir el daño al medio ambiente. El proceso después del pirólisis es la separación del tamaño de partículas, que incluye trituración y cribado; la fracción con tamaño de partícula superior a 0,2 mm es principalmente cobre y aluminio, que pueden ser separados y recuperados por neumática separación, mientras que los materiales activos de grafito y cátodo en la fracción con un tamaño de partícula inferior a 0,2 mm se pueden separar por flotación. Los materiales del cátodo después de la separación por flotación se purifican por hidrometalurgia para obtener metales preciosos como Co, Li, Ni, Mn, etc. Finalmente, los productos reciclados se pueden utilizar como materia prima para reproducir nuevas baterías de iones de litio, formando así un proceso de circuito cerrado.(Sun et al., 2021)

El proceso de ciclo cerrado tiene un costo directo de operación (químicos, operación de mano de obra, servicios públicos, energía, el costo de la purificación química del proceso propuesto se convierte a 4000 yuanes RMB/tonelada en cambio se puede obtener 21.090 yuanes/tonelada de ganancia, sin contemplar la inversión inicial y el coste de adquisición de baterías de LiCoO₂ de desecho(Sun et al., 2021).

Para esas mismas fechas, específicamente el 25 de diciembre, el consejo de estado creo el plan de implementación del sistema de responsabilidad ampliada del productor, el cual cobija

cuatro categorías de productos, las cuales son, electrodomésticos, electrónicos, vehículos, baterías de plomo ácido y materiales de embalaje. En este plan se fijaron los objetivos de reciclaje para tener una tasa de recuperación de residuos incluidos los LIB para el 2020 y una tasa del 50% para el 2025. Entre otras consideraciones se motivó la cooperación entre gobierno y los servicios prestados por terceros para atraer y consolidar capital social que se dedique al reciclaje de residuos de LIB.

Años más adelante en 2018 varios ministerios incluido el de tecnología de la información, se unieron para idear medidas para la recuperación de las baterías de energía, indicando que los fabricantes deben hacerse cargo de la recuperación y gestión del ciclo completo de la batería; además se animó a reutilizar primero y dejar de últimas el proceso de reciclaje. Se estipuló que las empresas de utilización en cascada deben tener la autorización del fabricante.

Los primeros esfuerzos de reciclaje también se dieron en el transcurso de ese año, con trabajos piloto en ciudades como Beijing, Shanghái, Jiangsu; así se fue implantando en todo el país hasta llegar a reciclaje de gran escala. Las principales ciudades han implementado regulaciones e iniciativas locales, como es el caso de Shenzhen que se convirtió en la primera ciudad de China en establecer el subsidio de reciclaje de baterías (Sun et al., 2021).

En algunas proyecciones realizadas; Suponiendo que el 50 % de las baterías usadas serían para aplicación de segundo uso, se encontró que alrededor de 33 GWh de baterías estarían disponibles para un segundo uso para en 2030, en cuestiones de reciclaje habría alrededor de 5-7 Kiloton (kt) de Li recuperado y 35-60 (kt) de Ni (Shafique et al., 2022).

En México, la empresa China ganfeng Lithium, que es una de las productoras más grandes de litio en el mundo y proveedor de Tesla, instalara planta de reciclaje, con la cual se

espera abastecer el creciente mercado de vehículos electrónicos (EV) de EE. UU y reciclar baterías de los automóviles Tesla, así como de los autobuses eléctricos fabricados en China que se utilizan en toda América Latina. Tesla ha estado comercializando vehículos en México desde el 2012, por tanto, en los próximos años están listas para retirarse.(Deslandes, 2020)

En Colombia en los últimos años, el mercado de vehículos eléctricos ha ido en aumento, tanto así que para el último año ha tenido un crecimiento aproximadamente del 92%, ya que para el mes de septiembre del 2021 se registraron 11.193 vehículos entre (HEV, EV Y PHEV) y para el corte del mes de septiembre del 2022 se han registrados 21.579 carros que usan tecnologías más limpias. ("INFORMES INTERACTIVOS ANDEMOS," 2022).

En el país existe el programa posconsumo que se fundamenta en el concepto de responsabilidad extendida REP, que se puede utilizar como un medio por el cual, se obliga al productor e importadores de algunos productos masivos a financiar y llevar acabo la gestión integral provenientes de sus productos, después de ser desechados por el consumidor final. En la ley 1672 de 2013 se indica los parámetros de la política pública de gestión de residuos de Aparatos eléctricos y electrónicos RAEE, generados en el territorio Nacional teniendo como alcance a las personas naturales, jurídicas, que importen, fabriquen, comercialicen, consuman y gestionen sus residuos; allí se dictan ciertas responsabilidades:

El productor será responsable directamente o a través de un tercero que actúe a su nombre, de fijar y financiar un sistema de recolección de los residuos de los productos colocados en el mercado, en alianza con empresas que cuenten con la respectiva licencia, permiso o autorización ambiental. Así mismo, debe dar prioridad a la reutilización o valorización de los residuos de este tipo.

Al mismo tiempo el comercializador de aparatos eléctricos y electrónicos tiene el deber de brindar apoyo técnico y logístico al productor, en la recolección y gestión ambientalmente segura de los residuos de estos productos; ya lo que corresponde al consumidor en concordancia con el principio de reconocer y respetar el derecho de todos los ciudadanos a un ambiente saludable, es entregar los residuos de estos productos, en los sitios que para tal fin dispongan los productores o terceros que actúen en su nombre (republica, 2013).

De hecho en el artículo 38 del Decreto-Ley 2811 de 2974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, manifiesta que según la cantidad o de la calidad de los residuos, las basuras, desechos o desperdicios, se podrá imponer a quien los produce la obligación de recolectarlos, tratarlos o disponer de ellos, indicándole los medios para cada caso y en el artículo 20° del Decreto 4741 de 2005 (hoy compilado en el Decreto 1076 de 2015), se establece que estarán sujetos a un Plan de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo para su retorno a la cadena de producción-importación-distribución-comercialización, los residuos o desechos peligrosos o los productos usados, caducos o retirados del comercio (Minambiente, S.f-b).

La responsabilidad de los gestores según la ley 1672 de 2013, se centra en Garantizar el manejo ambientalmente seguro de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), con estándares técnicos ambientales establecidos para la recolección y gestión de este tipo de residuos (republica, 2013).

Para las empresas gestoras de posconsumo, las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos y las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002, son las encargadas de otorgar o negar licencia ambiental para la construcción y operación de instalaciones para almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento

(recuperación/reciclado) y/o disposición final de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y de residuos de pilas y/o acumuladores.

Las actividades de reparación y reacondicionamiento de aparatos eléctricos y electrónicos usados no requieren de licencia ambiental (Minambiente, S.f-b).

Por parte del gobierno en la misma ley, se promueve una gestión integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), con el fin de minimizar los riesgos sobre la salud humana y el medio ambiente, para lo cual se crea un comité nacional, se desarrollan instrumentos jurídicos y legales, a través de los cuales se regula todo lo concerniente a los residuos, que sirven como instrumento legal para exigir de cada uno de los actores el cumplimiento de sus responsabilidades y la garantía de sus derechos. Se busca minimizar la producción de este tipo de residuos, a la vez promover su aprovechamiento para lo cual se facilita la creación y formalización de empresas de reciclaje de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), haciendo los trámites más fáciles, para la expedición de las licencias ambientales (república, 2013).

A la vez se comprometen a llevar un control por medio del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo en el marco de sus competencias, quienes deberán llevar estadísticas con ayuda del DANE del consumo clasificado de aparatos eléctricos y electrónicos que se comercialicen en el país, así como procesos de divulgación, elaborando a nivel nacional, una estrategia comunicativa, con el fin de divulgar qué son los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), los riesgos para la salud humana y cómo hacer una gestión final adecuada de los mismos; Capacitaran a productores, comercializadores y usuarios (república, 2013).

Como objetivos de la política posconsumo REP en Colombia se tienen los siguientes:

Que los residuos posconsumo no continúen siendo gestionados junto con los demás residuos domésticos generando impactos al ambiente y a la salud.

Incidir en el cambio de los patrones de consumo de la sociedad colombiana y en los patrones de producción (uso eficiente de recursos, reutilización de materiales, reciclaje).

Promover el aprovechamiento y valorización de los residuos. Finalmente, se exponen las resoluciones que han regulado la gestión REP a nivel nacional:

Envases de plaguicidas (Resolución 1675 de 2013 la cual derogó la resolución 693 de 2007)

- Medicamentos o fármacos vencidos (Resolución 0371 de 2009)
- Baterías usadas plomo ácido (Resolución 0372 de 2009, modificada parcialmente por la Resolución 0361 de 2011)
- Pilas y/o acumuladores (Resolución 1297 de 2010, modificada parcialmente por la Resolución 2246 de 2017)
- Llantas usadas (Resolución 1326 de 2017 la cual derogó la resolución 1457 de 2010)
- Bombillas (Resolución 1511 de 2010)
- Computadores y periféricos (Resolución 1512 de 2010)
- Envases y empaques (Resolución 1407 de 2018).

Desde el sector privado hay varias compañías involucradas en la descarbonización, entre ellas la compañía Enel, la cual está comprometida con la transición y la modernización energética; tiene como objetivo generar cero emisiones para el 2040, por tanto, buscan electrificar el sector automotriz y la modernización del alumbrado.(Enel, 2022b).Como plan de posconsumo en abril de 2021 un equipo interdisciplinario de la compañía, se propuso crear

el primer Sistema de Almacenamiento de Energía con Baterías en el país y para su instalación se escogió la Central Termoeléctrica Termozipa.(Enel, 2022a)

De igual manera, la empresa Bax se dedica a darle un segundo uso a las baterías de ion litio como sistemas de almacenamiento de energía, como respaldo residencial o industrial y con miras a largo plazo a ser colocadas como complemento de las renovables para hacer de almacenamiento que le falta a la solar. La operación se hace en cinco pasos: recepción de las baterías usadas, que en su gran mayoría son de vehículos eléctricos de diferentes segmentos; proceso de recuperación y transformación de acuerdo a su capacidad; preparación para la segunda vida y venta del producto o servicio en el mercado. (Portaluppi, 2021)

Como tal plantas de reciclaje de baterías, se encuentra la planta Mac y Clarios ubicada en yumbo valle del cauca (Mesa, 2020), la cual es especialista en baterías de ácido plomo provenientes de vehículos, moto carga, motocicletas, UPS y equipos electrónicos. Allí se extraen materiales que son usados para la fabricación de futuras baterías. El proceso de reciclaje hace parte del programa Ecosteps, el cual también es diseñado por MAC y Clarios Andina para la recolección y transporte de las baterías desechadas hasta los puntos de almacenamiento, para luego ser transportadas por Clarios hasta la planta.(Mesa, 2020)

Legislación y Planes de Manejo o de Gestión en la Ciudad de Bogotá.

La inserción de carros eléctricos en la ciudad aumentado en los últimos años, a corte de septiembre de 2021 había 5.534 vehículos registrados entre HEV, EV y PHEV, ya para el mismo mes del año 2022 circulaban 9.801 vehículos entre carros, camionetas y buses, lo que representa un aumento del 77% en el mercado de vehículos eléctricos ("INFORMES INTERACTIVOS ANDEMOS," 2022). De la flota de buses 1.944 pertenecen al sistema integrado de transporte público de Bogotá, de los cuales 1289 pertenecen a tecnologías un poco más limpias (eléctricos,

a gas y diesel Euro VI) y 655 totalmente eléctricos. Se espera que al finalizar el año 2022 hayan ingresado cerca de 830 para un total de 1.485 de buses totalmente eléctricos (Ramirez, L, 2021). Se estima que 172 buses eléctricos equivalen a haber sembrado 148.000 árboles en Bogotá para capturar CO₂; de ese tamaño es el impacto ambiental de este proyecto (TransMilenio, 2022). Con esta inserción de vehículos Bogotá seguirá posicionándose como una de las ciudades con la mayor flota de buses eléctricos de Latinoamérica, mientras que Colombia se transformará en el país con el mayor número de vehículos eléctricos adjudicados después de China.

La ciudad cuenta con varios puntos de recarga para vehículos eléctricos o conocidas también como electrolinería, por lo general, pertenecen a la empresa Enel. Una de las más grandes y de carga rápida se encuentra ubicada en el centro comercial Unicentro en Bogotá. (Chávez, 2021) Allí Enel X presta cuatro cargadores JuiceBox de 7 kilovatios (kW) y tres cargadores de carga rápida, uno de ellos de 43 kW, otro de 50 kW y un último de 150 Kw, el cual permite recargar el vehículo en un tiempo promedio de 45min; siendo el de mayor potencia del mercado y el primero que se instala en este tipo de establecimientos en el país, debido a que se había implementado solo en los patios de carga de los buses del sistema integrado de transporte público (enel, 2021b).

De patios de recarga se encuentran 5 en la ciudad, ubicados, dos en Fontibón, dos en Usme y uno en la localidad de Suba, se proyecta la instalación de 4 puntos más para poder soportar la demanda de energía que se requiere para alimentar 1.485 buses eléctricos del SITP. Los sitios de recarga están a cargo de la compañía Enel x de igual manera en algunas áreas utilizan las baterías al finalizar su primera vida útil como sistemas de almacenamiento (enel, 2021a); sin embargo, se espera un gran reto cerca del 2030 cuando se tengan todas las baterías provenientes de los SITP que actualmente están en circulación.

El principal sitio para disposición final de residuos en la ciudad de Bogotá, es el relleno sanitario doña Juana, el cual está ubicado en la localidad de ciudad Bolívar y diariamente le llegan aproximadamente 6.500 toneladas de residuos, de los cuales el 80% tiene potencial para ser reutilizados y algunos de ellos pueden ser catalogados como residuos peligrosos, como lo son bombillos y lámparas fluorescentes, pilas y baterías, cilindros de gas, residuos eléctricos y electrónicos, tóner y cartuchos vencidos, medicamentos vencidos, envases contaminados, trapos contaminados, sin embargo, estos terminan enterrados. (Vargas, 2021)

Por tal motivo, se han llevado campañas de sensibilización como, poner a dieta a doña Juana, que consistía en bajar la cifra a 6.000 durante 3 meses y tenía como estrategia tres pasos: separación adecuada de residuos para luego entregárselos al reciclador de oficio, reducir el consumo y reutilizar todo lo que sea posible.

Se ha buscado el aprovechamiento de residuos producidos en las entidades distritales; por lo cual, el departamento administrativo de la defensoría del espacio público DADEP realizó el plan de acción interno publicado en enero de 2022, dando cumplimiento al decreto 400 de 2004 y basándose en el Decreto Distrital No 400 de 2004. El plan indica que las entidades distritales deben entre otros, designar un promotor (organización de recicladores) ante la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos- UAESP, para efecto de ser el enlace ante la entidad coordinadora; este tendrá como función es de adoptar con el acompañamiento de la organización y de la UAESP un Plan de Acción Interno en el que se definan las metas, alcances, organizaciones de recicladores vinculadas al proyecto, indicadores de gestión y de evaluación.(publico, 2022)

Así mismo, se debe tener en cuenta la Directiva Distrital No. 009 de 2006, que establece que el material separado con potencial reciclable debe ser entregado a las organizaciones de

recicladores de oficio en condiciones de pobreza y vulnerabilidad, para cumplir con lo establecido en la norma.

Dentro de este plan se habla también de los residuos RAE de propiedad pública, los cuales tienen lineamientos normativos especiales de donación, destrucción y/o dada de baja, por lo que la entidad cuenta con un Plan específico de Gestión Integral de Residuos Peligroso, donde se detallan los procesos y procedimientos de su manejo, almacenamiento y disposición final adecuada.

Desde la secretaria distrital de ambiente se promueven dos programas posconsumo a través de Pilas con el Ambiente y Recopila, los cuales cuentan con cerca de 800 puntos para que los ciudadanos realicen la disposición de todo tipo de baterías de forma muy generalizada (baterías de celulares, computadores), excluyendo baterías provenientes de vehículos como son las de ion litio; ya que su inserción en el mercado es relativamente nueva. Los puntos de disposición están ubicados por lo general en almacenes de cadena e instituciones.(S. d. ambiente, S.f-b)

Sin embargo, la ciudadanía en general puede solicitar un punto de disposición, si pertenecen a las Ciudades como Bogotá y Medellín y si los residuos recolectados pesan más de 8kg.

Pilas con el ambiente nació de una iniciativa de ANDI, como programa piloto posconsumo para recolectar, transportar y gestionar las pilas y/o acumuladores usados. Inició el 29 de julio del 2010, con la instalación de dos puntos de recolección en Bogotá teniendo buena acogida, por tanto, para el 2019 se instalaron a 4558 puntos de recolección a nivel nacional; dando Cubrimiento a los 32 departamentos, 5 distritos especiales y 384 municipios de la división

político administrativa del país. Adicional a eso Participaron en 37 jornadas, impactando más de 150 municipios.(P. c. e. ambiente, S.f)

En el caso de Recopila se encarga de facilitar los contenedores para que la población realice la disposición, luego recogen las baterías y a través de gestores autorizados son almacenadas en acopios, para después ser transportadas a las instalaciones de un gestor con licencia para su respectivo aprovechamiento; allí son clasificadas e introducidas a nuevos ciclos productivos como materia prima.(Recopila, S.f)

Para las baterías de plomo acido provenientes de vehículos y motocicletas se maneja el programa posconsumo basado en la resolución 372 de 2009; por la cual, se instauran los elementos que deben incluir los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Baterías Usadas Plomo Acido, y se adoptan otras disposiciones y se regula parcialmente la prevención y el uso de los residuos o desechos peligrosos generados en el campo de la gestión integral. (Minambiente, S.f-a).

El programada de posconsumo de baterías plomo acido se da por medio de las empresas Recoenergy -Ecosteps - Claros Andina, las cuales se encargan de recoger y disponer este tipo de residuos. Como puntos de disposición para los usuarios, están, talleres, servitecas, almacenes de repuestos y grandes superficies las cuales garantizan el adecuado almacenamiento.

Para las empresas e instituciones que quieran disponer residuos con potencial de aprovechamiento de manera correcta, se utiliza la recepción de solicitudes al correo reciclaton.bogota@ambientebogota.gov.co donde se debe especificar el tipo de residuo, la cantidades de unidades y el peso, luego un equipo de la Secretaria Distrital de medio ambiente se encarga de hacer la gestión con el programa posconsumo.(S. d. ambiente, S.f-a)

Con este tipo de iniciativas se buscaba el adecuado cierre del ciclo de vida de los residuos peligrosos provenientes de pilas y acumuladores como los son el plomo, ácido, mercurio, cadmio, litio, evitando su mala disposición y contaminación de los ecosistemas urbanos.

Capítulo 5 Diseño Preliminar de un Plan de Gestión para Residuos de Baterías Ion Litio de Carros Eléctricos en Bogotá.

Objetivo

Recolectar, almacenar, reutilizar y reciclar los residuos procedentes de las baterías ion litio de vehículos eléctricos al finalizar su vida útil en la ciudad de Bogotá- Colombia.

Objetivos Específicos

Llevar acabo procesos pedagógicos y de sensibilización a la población, que incluya información de los puntos de disposición y normatividad vigente.

Realizar e implementar rutas estratégicas de recolección para puntos específicos, garantizando un almacenamiento seguro y posterior reutilización y/o reciclaje.

Ubicar, identificar y adquirir posibles puntos idóneos para almacenamiento y procesos de reciclaje.

Realizar trabajo en conjunto con fabricantes, comerciantes y entidades pioneras en reciclaje de residuos similares como lo es recopila, Mac y Clarios.

Incluir a los recicladores de oficio por medio de alianzas con la UAEPS, en el proceso de gestión integral de los residuos provenientes de baterías de ion litio.

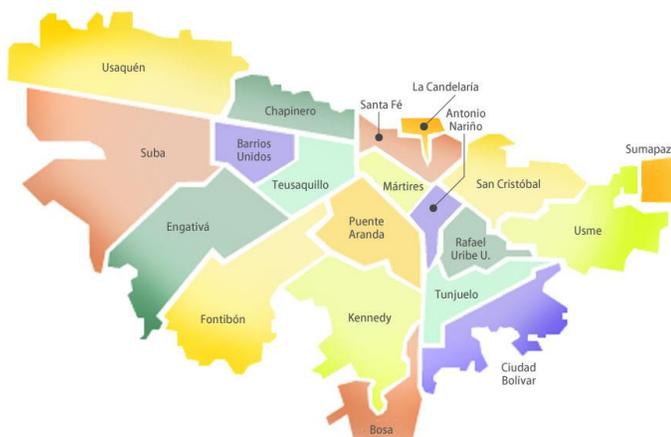
Política Ambiental

La política está basada en el compromiso por conservar un ambiente sano para el disfrute de la ciudadanía, promoviendo y apoyando la transición energética, desde un enfoque de mitigación de los impactos generados en el ciclo de vida de las baterías Ion litio, utilizadas en el proceso de electrificación del sector transporte en la ciudad de Bogotá. Esto se logrará mediante:

- El Reciclaje de los componentes de las baterías desechadas para la fabricación de nuevas baterías, evitando la extracción de materia prima que consume energía y recursos.
- La Reutilización de baterías para segundo uso como sistemas de almacenamiento de energía proveniente de sistemas fotovoltaicos o energías alternativas y para carga rápida de los vehículos eléctricos.
- Evitando la contaminación del recurso hídrico y suelo, adecuando puntos estratégicos para la disposición y almacenamiento de estos residuos que pueden ser peligrosos para los ecosistemas y para la salud humana.
- Mejorando la calidad del aire al disminuir las emisiones de CO₂, remplazando los vehículos de combustión fósil por eléctricos, así como optimizando los procesos de reciclaje.

Ubicación de Ejecución del Plan

La ciudad de Bogotá está constituida por 20 localidades, 19 urbanas y una rural (Sumapaz) como se puede observar en el mapa de la figura 26. Cuanta con 7.901, 65 habitantes y según cifras de Andemos (2022), circulaban 9.801 vehículos entre carros, camionetas y buses al corte de septiembre del 2022.

Figura 26*Mapa de Bogotá*

Fuente: (MapalInteractivo, 2014)

Nota. Se puede apreciar la distribución política y administrativa de la ciudad, donde se muestran las 20 localidades que la componen.

Cantidad y Tipo de Materiales que Componen el Residuo al Finalizar el 2030

Según el promedio de vida útil de la batería ion litio en vehículos eléctricos, que es de 8 a 10 años, se espera para el 2030 tener una batería por cada vehículo que circulara al finalizar el 2022; por tanto, se tendrían 9.801 uds provenientes de los carros que circulan al corte de septiembre de 2022 más aproximadamente 6.232 uds, que es el promedio de vehículos que ingresarían en los tres meses que faltan para finalizar el 2022, para un total de 12,801 uds.

Los principales materiales que se tendrían serían plástico, cables, aglutinante, metales (litio, cobalto, cobre), minerales (carbón) y cables.

Problemática Socio Ambiental Asociada al Manejo de Este Tipo de Residuos

Los residuos provenientes de baterías Ion litio pueden suponer grandes riesgos para la salud humana y la de los ecosistemas, si no se disponen y se tratan de manera correcta, ya que metales como el litio y el cobalto son tóxicos; el cobalto presente en el suelo puede ser

acumulado por las plantas principalmente en las partes comestibles, como en la fruta y las semillas; sin embargo, no posee la característica de biomagnificación, que es el aumento de la concentración a lo largo de la cadena trófica, eso quiere decir que los alimentos que llegan a nuestros platos siguen con las mismas concentraciones de cobalto; ya en el caso de la presencia de cobalto en agua puede adherirse a sedimentos o puede permanecer en forma iónica. (enfermedades, 2021)

No obstante, de la importancia de darle buena disposición a este tipo de residuos, la ciudad no cuenta con puntos establecidos para las baterías recargables de ion litio provenientes de vehículos eléctricos, solo con puntos de recolección de baterías y/o pilas provenientes de dispositivos electrónicos, debido posiblemente a que la inserción de vehículos es reciente y la vida útil de las baterías aun no finaliza.

Por otra parte, a pesar de los esfuerzos realizados al plantear y ejecutar diferentes planes de manejo, para tener una ciudad limpia y poder darle tratamientos a los diferentes residuos generados por la población, en la ciudad de Bogotá se pueden encontrar varios puntos críticos en zonas verdes, humedales y rondas de los ríos, donde priman residuos domésticos e industriales ricos en metales pesados tales como mercurio y cromo (Castiblanco, 2021), lo que posiciona a las fuentes hídricas como referente de suciedad y contaminación a nivel mundial; como lo es el caso de nuestro río Bogotá, el cual es considerado uno de los ríos más contaminados del país y a su vez uno de los más importantes, ya que al tener una influencia de 589.143 hectáreas y atravesar 46 municipios, más la ciudad de Bogotá, lo convierte en un escenario propicio para desarrollar actividades agrícolas, pecuarias e industriales ("CAR | Río Bogotá," 2021), las mismas que se transforman en fuente de contaminación para el propio afluente. El río nace en el páramo de Guacheneque en el municipio de Villapinzón, desde allí en su cuenca alta inicia la

contaminación principalmente por actividades de curtiembres, donde se vierten sustancias químicas como hidrocarburos, ácidos disolventes, metales y cianuros, también se genera gran cantidad de materia orgánica (grasa, pedazos de carne y piel) (Artuz et al., 2011); a pesar de esto, a pocos kilómetros de su nacimiento abastece a 26 acueductos comunitarios, de los cuales 25 de ellos no cuentan con sistemas de potabilización, pero la calidad de agua hasta el momento lo permite ("CAR | Río Bogotá," 2021). Ya en traspaso de su recorrido, el grado de contaminación va a aumentar significativamente, en especial cuando atraviesa Bogotá, donde recibe gran cantidad de residuos sólidos de todo tipo y aguas residuales de más de 9 millones de personas, por medio de los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo. Cuando desemboca en el Río Magdalena, aproximadamente más de 12 millones de personas pudieron haber tenido acceso a este recurso (CAR | Río Bogotá, 2021), el cual no está en las mejores condiciones.

A parte del ser humano, cerca de 90 especies de animales se abastecen y habitan el Río Bogotá (Castiblanco, 2019), los cuales sobreviven en medio de la contaminación. De igual manera sucede con los humedales, los cuales albergan cerca de 210 especies de plantas terrestres entre árboles, arbustos, herbáceas y un aproximado de 650 especies como aves, mamíferos, reptiles y anfibios.

Estrategias

Para lograr el cumplimiento de los objetivos, el plan cuenta con seis (6) estrategias, las cuales son: investigación, pedagogía con la población, participación ciudadana, cooperación entre el sector privado- público, orden en el proceso, manejo y conocimiento de este tipo de residuos.

Desarrollo del Plan

Componente 1. Creación de la empresa y del programa.

Se requiere de crear una empresa, la cual estará a cargo del almacenamiento y tratamiento, así como de coordinar las entregas de baterías para un segundo uso a los aliados, como lo es Enel x. Para constituir la empresa se requiere radicar la siguiente documentación ante la entidad encargada, en este caso la cámara de comercio de Bogotá: Rut (Registro único tributario, documentos de constitución (mediante notaria), formularios (descargar de la página o en Pa- punto de atención reclamarlos), formalización (registro de matrícula mercantil cámara de comercio de Bogotá).(C. d. C. d. Bogotá, S.f)

Sera una empresa mediana al tener de 51 a 200 trabajadores, ya que, al considerar las rutas de recolección, se pueden llevar a cabo de manera mensual o trimestral, dependiendo la cantidad de residuos obtenidos en los puntos. Se debe comprar un camión y/o vehículo por cada dos o una de las rutas. Lo referente a la contratación, seria de conductores y auxiliares y parte administrativa.

Se requiere de crear un programa similar a recopilación, el cual también puede ser liderado por la ANDI; por medio del cual, se recolecten las baterías en los puntos dispuestos para disposición por parte de los usuarios y sean transportadas, tanto a los puntos de almacenamiento, como a la planta de reciclaje.

La planta de reciclaje quedaría ubicada en la sabana de Bogotá, estará sectorizada por áreas, una para cada proceso (desmantelación – preparación, pirometalúrgico, proceso hidrometalúrgico, almacenamiento de residuos reciclados.

El presupuesto general para la ejecución del plan de gestión oscila cerca de los \$80.644.590.944, se puede ver el detalle en la tabla 7.

Tabla 6.*Presupuesto*

PLAN DE GESTIÓN	cantidad	Precio Unidad / ud
Camiones recolectores 100% eléctricos.	10	\$44.000.000
Sitio para la planta	1	\$2.418.000
Infraestructura planta	1	\$80.170.002.944
Contenedores	1	\$570.000
Electricidad para carga de los vehículos	1	\$700.000
Mano de obra	2	\$2.200.000
Mantenimiento Preventivo	2	\$1.000.000
Mantenimiento correctivo inspección sin contar posibles arreglos)	1	\$2.000.000
Nomina trabajadores área servicios generales (aseo, conductores)	5	\$1000000
Nomina trabajadores área administrativa(auxiliares)	2	\$1000000
Nomina trabajadores área administrativa (representante legal)	3	\$2500000
Nomina trabajadores (operativos)	10	\$1.500.000
Total		\$80.644.590.944

Fuente: (creación propia).

Nota. La tabla 6 refleja una aproximación del dinero que se necesitaría para la implementación del plan de gestión de residuos de baterías Ion litio provenientes de los vehículos eléctricos que circulan por la ciudad de Bogotá.

Componente 2. Manejo y tratamiento de residuos de baterías Ion litio

Puntos de disposición. Los puntos para disposición pueden ser los mismos que actualmente existen para baterías de ácido plomo, los cuales ya están identificados y son reconocidos por la población. Se pueden implementar nuevos puntos los cuales pueden estar ubicados en las alcaldías locales, aportando 20 puntos para disposición y recolección; otros posibles sitios idóneos serian algunos concesionarios, los que mejor estén posicionados en ventas

de vehículos eléctricos como lo son Renault, BYD, BMW, Nissan, Oranch, Stark, Mitsubishi, Sunwin, JAC, Dongfen. Se puede visualizar el ranking en la tabla 6.

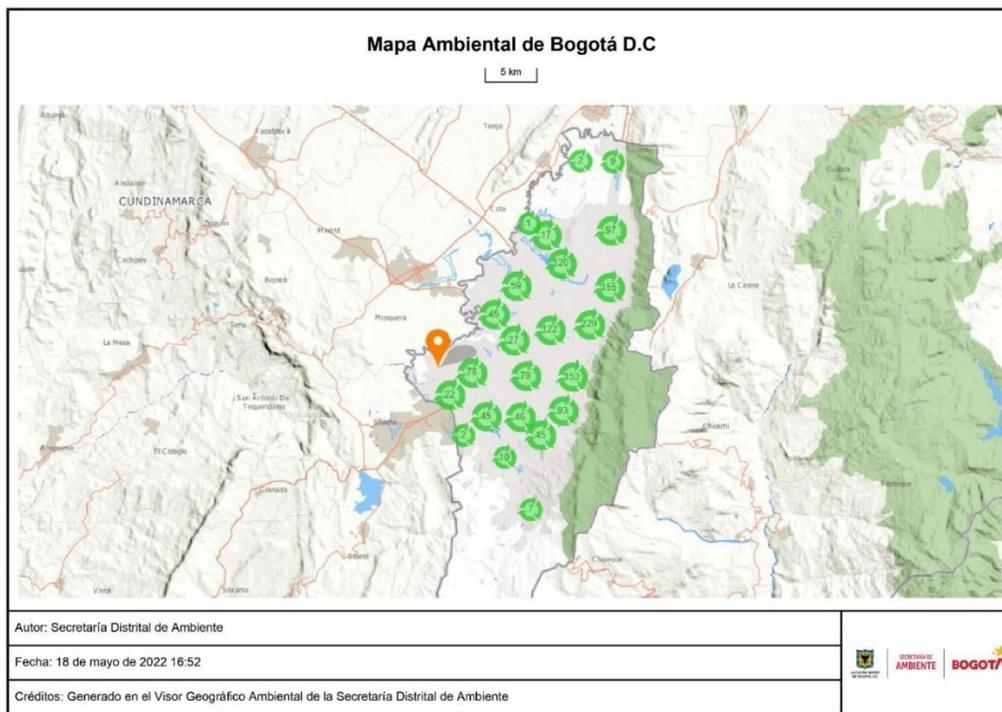
Tabla 7.

Ventas de vehículos eléctricos por marca

Puesto	marca	Unidades Registradas
1	Renault	1.134
2	BYD	646
3	Bmw	635
4	Nissan	228
5	Oransh	185
6	Stark	160
7	Mitsubishi	44
8	Sunwin	39
9	JAC	30
10	Dong	20

Fuente: (Reting, S.f)

Nota. La tabla 7 refleja un ranking de las 10 marcas que más venden unidades de vehículos eléctricos.

Figura 27.*Puntos de disposición para baterías.*

Fuente: (S. D. d. A. d. Bogotá, S.f)

Nota. Se puede visualizar la distribución de los puntos de disposición, existentes para baterías de ácido plomo en la ciudad de Bogotá.

Pretratamiento y desmantelación. Tanque de pretratamiento para el proceso de descarga de la batería por medio de agitación; el tanque estaría dividido en 5 partes, 4 de ellas son para colocar las baterías y la quinta entraría en centro para el agitador, el resto del volumen lo ocupa agua con partículas de hierro en polvo que se mantienen en suspensión gracias al agitador. El tanque tendrá una relación H/D; tiene que estar entre 1 y 3.(García, 2016)

El proceso de trituración es importante para facilitar los procesos posteriores, puede ser una trituradora de 4 ejes con capacidad 5000 Kg por hora.

Proceso Hidrometalúrgico. Tanques de lixiviación: Estos trabajan a una temperatura de 90 °C y a presión atmosférica, por tal razón, el fondo debe tener una resistencia y las paredes

tendrían un aislamiento hecho con roca, sin necesidad de aumento en el espesor y tendrían un revestido de aluminio. El proceso de lixiviación es de aproximadamente 4 horas, al diseñar los tanques se tiene en cuenta un llenado del 80%.

Tanques de precipitación: Están dispuestos para mezclas utilizando la agitación, por ello se recomienda que sean verticales y deben tener una resistencia en el fondo porque trabajan a una temperatura de 70°C. Se necesitaran dos tanques, el primero donde se lleva a cabo el proceso de coagulación con un tiempo de 5 minutos en fuerte agitación y el segundo para la floculación con agitación lenta.(García, 2016)

Filtros. Se requieren dos filtros, uno para separar el oxalato de cobalto de la primera etapa de precipitación y otro para recuperar el carbonato líquido obtenido en la segunda precipitación.(García, 2016)

Mezclador sedimentador. Este se utilizara para las diferentes etapas de extracción líquido-líquido, disponiendo de dos tanques, uno para el proceso de agitación y otro para el tiempo de remanso.(García, 2016)

Tanques auxiliares. Estos tanques son importantes, debido a que durante todo el proceso hay actividades continuas y discontinuas, entonces prestan la función de almacenamiento mientras se da continuidad a la siguientes fases.(García, 2016)

Componente 3. Normatividad y permisos ambientales

El plan entra en concordancia con el plan ambiental (PGA) de la ciudad de Bogotá al contribuir y coincidir con los objetivos (calidad del agua -regulación hidrológica, calidad del suelo, calidad ambiental del espacio público, uso eficiente de la energía, uso eficiente de materiales y cultura ambiental) los cuales se reúnen en tres grandes categorías (calidad ambiental, ecoeficiencia y de armonía socioambiental).El plan ambiental (PGA) es adoptado

bajo la resolución 3514 de 2010 y tiene una duración de 30 años (2008- 2038), (S. d. ambiente, S.f-c).

Con la resolución 1297 de 2010 se establecen los sistemas de recolección selectivas y gestión ambiental de pilas y acumuladores (Anla, 2011), para lograr la implementación se requiere solicitar licencia ambiental, la cual se reglamentó por medio del Decreto 1753 de 1994 y que según la ley 99 se define como el instrumento para prevenir, mitigar, corregir, compensar y manejar los efectos ambientales durante el desarrollo de cualquier obra o actividad y es un requisito para toda actividad que genere cambios al paisaje o al ambiente(CAR, S.f). En este caso para el tema de disposición, clasificación y opciones de tratamiento de residuos se requiere solicitar licencia ante la corporación autónoma regional de Cundinamarca y la Anla.

El procedimiento para la solicitud de la licencia ambiental inicia con la inscripción del proyecto donde se proporciona información sobre las características y se solicita a la autoridad ambiental la definición de elaborar el Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA), así como los términos de referencia pertinentes para el DAA o para el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), según sea el caso; si se requiere DAA la autoridad ambiental fija los tiempos para su elaboración, en un plazo no mayor a 30 días; luego definirá la alternativa sobre la cual se requiera elaborar el EIA, en un plazo no mayor a 60 días, aparte la autoridad puede solicitar información adicional si lo requiere. Después de presentar la documentación solicitada en un plazo no mayor a 120 días la autoría indica si otorga o niega la licencia.(CAR, S.f)

El ministerio de desarrollo sostenible cuenta con pasos de referencia para presentar un estudio de impacto ambiental (EIA) en proyectos de construcción y operación de instalaciones, cuyo objetivo sea el almacenamiento, tratamiento y/o aprovechamiento (recuperación/reciclado) de residuos de aparatos eléctricos o electrónicos – RAEE. Entre los cuales están: Descripción del

proyecto, Fase de planeación- diseño del proyecto, Fase de construcción- montaje, Área de influencia, participación- socialización de las comunidades, caracterización del área de influencia, zonificación ambiental, demanda uso, aprovechamiento y/o afectación de recursos naturales, evaluación ambiental y zonificación de manejo ambiental.

Se debe solicitar permiso de vertimiento a la corporación que tenga el sitio en jurisdicción, en este caso a la corporación autónoma de Cundinamarca CAR, ya que se verterá agua tratada proveniente del proceso de tratamiento hidrometalúrgico llevado a cabo en la planta de reciclaje, para la solicitud se debe adjuntar las siguiente documentación según la ley 99 de 1993 y el decreto 1076 de 2015: certificado de existencia y representación legal (con fecha de expedición no mayor a 3 meses), localización de la planta, características de la fuente que originará el vertimiento, clase, calidad y cantidad de desagües, descripción, memorias técnicas, diseño y planos del sistema de tratamiento propuesto, reporte de caracterización de muestreo compuesto expedido por el laboratorio acreditado o en proceso de acreditación en el cual se caracterice el afluente y efluente del sistema de tratamiento, indicando el tiempo de retención, costo del proyecto, obra o actividad. Según el (Acuerdo CAR 023 de 2009), se exige la consignación del pago por servicio de evaluación, caracterización de las actividades que generan el vertimiento, mapa que contenga sitio de origen, cantidad y localización georreferenciada de las descargas al cuerpo de agua o al suelo, nombre de la fuente receptora del vertimiento mostrando la cuenca hidrográfica a la que pertenece, caudal de la descarga expresada en litros por segundo, frecuencia de la descarga expresada en días por mes, tiempo de la descarga expresada en horas por día, tipo de flujo de la descarga indicando si es seguido o intermitente y características del actual vertimiento existente o estado final previsto para el vertimiento, proyectado de conformidad con la norma de vertimientos vigente (ubicación, descripción de la

operación del sistema, memorias técnicas y diseños de ingeniería conceptual y básica, planos de detalle del sistema de tratamiento y condiciones de eficiencia del sistema de tratamiento que se adoptará, concepto sobre el uso del suelo expedido por la autoridad municipal competente y evaluación ambiental del vertimiento). En caso de verter a una fuente hídrica superficial se debe tramitar el permiso de ocupación de cauces. Por último, se debe diligenciar el formulario Único Nacional de Permiso de Vertimientos.

Componente 4. Monitoreo y seguimiento

Según la ISO 14001 se debe tener un sistema para controlar cualquier cambio y avance realizado, de igual manera tener responsabilidades definidas, documentación al día y dar capacitaciones al personal.

En el caso de cada uno de los procesos del plan, el sistema y/o programa de seguimiento puede dividirse por categorías y/o componente ambiental: Calidad del aire, calidad del suelo y del agua, para medir de manera más organizada la eficiencia y eficacia de las actividades propuestas para las medidas de manejo implementadas, con el fin de plantear las medidas correctivas correspondientes a lo propuesto en las fichas generales del Plan de gestión ambiental. Este programa de seguimiento y control, tendrá metas y objetivos claros por cada componente o categoría. Las fichas de seguimiento y control se pueden apreciar en las tablas: 8,9 y 10.

Tabla 8.

Ficha seguimiento y control - aguas residuales

Aguas residuales
Objetivo
<ul style="list-style-type: none"> - Chequear la efectividad de la PTAR dentro de la planta de reciclaje - Chequear que las actividades dentro de la planta de reciclaje no generen impactos nuevos
Metas
- Verificar que las actividades de manejo de aguas residuales se estén llevando a cabo en un 100%

-
- Realizar monitoreos anuales a los parámetros físico- químicos en el sector del río Bogotá que sería donde se vertería el agua residual tratada
 - Realizar todos los monitoreos programados de aguas residuales domesticas e industriales para evaluar si se encuentran dentro de los rangos establecidos por la normatividad ambiental vigente
-

Acciones de Monitoreo y seguimiento

Verificar las condiciones de calidad del agua a través de un laboratorio acreditado como el del IDEAM o CAR

Tomar las muestras de agua y analizar los parámetros físico- químicos tales como Temperatura, Demanda Biológica de oxígeno, Demanda Química de oxígeno, solidos suspendidos, solidos totales con los diferentes monitoreos se elabora una base de datos que permite observar posibles evoluciones, cambios y/o alteraciones en el componente hídrico.

Mantenimiento y limpieza de los equipos de la Planta

Obtener el % de remoción

Conocer cantidad de lodos y sedimentos generados y % de aprovechamiento

Indicadores

-Cumplimiento de los monitoreos: CM: no de monitoreos realizados/no de monitoreos programados x 100

-Calidad del vertimiento: CV: No de parámetros medidos que cumplen/no de parámetros medidos x 100

-Aguas residuales generadas en el proceso Hidrometalúrgico: volumen de aguas residuales industriales/volumen total de aguas residuales generadas x 100

-Comportamiento de la calidad del agua: CCA: Valor inicial por parámetro fisicoquímico y Bacteriológico / Valor de monitoreo por parámetro fisicoquímico y Bacteriológico.

-NSF Water Quality Index: Índice de calidad del agua: Método estandarizado para comparar la calidad del agua de varios cuerpos de agua

-Efectividad del tratamiento: ET= (Carga del efluente / Carga del Afluente) x 100

-Impacto de parámetros individuales: Límite de comparación es el valor máximo o mínimo establecido en el DECRETO 1575 DE 2007, considerando la afectación a la salud pública. IH₂O= (Diferencia de los valores obtenidos aguas arriba y abajo / valor de la norma) x 100

Fuente: (creación propia)

La tabla 8 muestra la ficha de seguimiento y control al componente agua, la cual refleja las acciones e indicadores utilizados para el cumplimiento de los objetivos.

Tabla 9.*Ficha Emisiones atmosféricas y ruido*

Emisiones atmosféricas y ruido
Objetivo <ul style="list-style-type: none"> - Constituir lineamientos para el seguimiento y control de las emisiones generadas en la generación de la energía utilizada para la carga de vehículos - Constituir lineamientos para el seguimiento y control de las concentraciones y emisiones generadas por los equipos de la planta no eléctricos - Monitorear y registrar niveles de ruido en la planta de reciclaje. - Verificar el avance en los estudios e investigaciones para la optimización del ciclo de vida de las baterías ion litio
Metas <ul style="list-style-type: none"> - Verificar que las actividades propuestas para la mitigación de impacto de contaminación atmosférica se estén llevando a cabo en un 100% - Realizar seguimiento a los niveles del ruido generados para sobrepasen los límites de ruido ambiental establecidos en la legislación ambiental vigente (Res. 627 de 2006). - Realizar todos los monitoreos Cumplir con los protocolos de monitoreo y límites permisibles de emisión de respirable (PM10), establecidos en la legislación ambiental vigente (Res. 2154 y 610 de 2010).
Acciones de Monitoreo y seguimiento <p>Realizar monitoreos de las emisiones generadas en el origen de la energía Tener y analizar los estudios de análisis de vida de los baterías actualizados para conocer y consolidar un base de datos que sirva para toma de nuevas decisiones Monitoreos de emisiones y niveles de ruido (cada dos años) en la planta Mantenimiento, revisión y limpieza de los equipos de la Planta Capacitaciones al personal sobre el adecuado uso de los elementos de protección personal EPP</p>
Indicadores <p>-Cumplimiento Calidad del Aire: $CCA = (\text{No. de Monitoreos de Calidad de Aire realizados} / \text{No. de Monitoreos de Calidad de Aire Establecidos en la Licencia Ambiental}) \times 100$</p> <p>Cumplimiento Normatividad: $CN = (\text{No. de parámetros que cumplen los límites fijados en la normatividad} / \text{No. de parámetros monitoreados y establecidos en la licencia ambiental}) \times 100$</p> <p>Cumplimiento Ruido: $CR = (\text{No. de Monitoreos de ruido realizados} / \text{No. de Monitoreos de ruido Establecidos en la Licencia Ambiental}) \times 100$</p>
Fuente: (creación propia)

Nota. La tabla 9 muestra la ficha de seguimiento y control al componente aire, la cual refleja las acciones e indicadores utilizados para el cumplimiento de los objetivos.

Tabla 10.*Ficha seguimiento y control - Manejo y disposición de residuo solidos*

Manejo y disposición de residuo solidos
Objetivo
<ul style="list-style-type: none"> - Verificar el cumplimiento de las medidas escritas en el plan de manejo integral de residuos. - Monitorear la cantidad de residuos de batería finales que salen de la planta - Realizar la disposición final dentro de la normatividad vigente - Identificar qué tipo de residuos se están generando dentro de los diferentes procesos del plan para así poder dar tratamiento y disposición de mejor manera
Metas
<p>Confirmar que las actividades de manejo integral de residuos se estén implementando completamente.</p> <p>Tener registro de la cantidad de residuos de baterías provenientes de la planta</p> <p>-Realizar correcta disposición de los residuos</p>
Acciones de Monitoreo y seguimiento
<p>Realizar monitoreos de residuos generados en todos los procesos del plan eso permitirá controlar y evaluar constantemente su manejo integral, para cumplir con la normatividad ambiental vigente y disminuir los impactos socio ambientales</p> <p>Conocer y monitorear la cantidad de residuos provenientes de la planta para realizar la adecuada disposición e implementar mejoras para la optimización de la planta</p> <p>Revisión periódica de los puntos de disposición para el usuario</p> <p>Mantenimiento, revisión y limpieza de los puntos de disposición para los usuarios</p> <p>Monitoreo a la frecuencia de usuarios por punto de disposición eso ayudara a controlar las rutas y tiempos de recolección.</p> <p>Registro de cantidad de residuos ingresados a los puntos de almacenamiento</p>
Indicadores
<p>Disposición de residuos sólidos: $DRS = (\text{Kg de residuos sólidos dispuestos (Kg/mes)} / \text{Kg de residuos sólidos generados (Kg/año)}) \times 100$</p> <p>Reciclaje de residuos: $(\text{Kg de residuos sólidos reciclados (Kg/semestre)} / \text{Kg de residuos sólidos ingresados a la planta (Kg/semestre)}) \times 100$</p>
Fuente: (creación propia)

Nota. La tabla 10 muestra la ficha de seguimiento y control a los residuos sólidos generados, entendiendo que inicialmente puede haber afectación al componente suelo. La ficha refleja las acciones e indicadores utilizados para el cumplimiento de los objetivos.

Conclusiones

En la revisión de los análisis de ciclo de vida realizados a la batería Ion litio usada en carros eléctricos, se evidencia la necesidad de fabricarlas y cargarlas con energía limpias; construyendo así, un producto sostenible, con el cual se pueda verdaderamente contribuir a la disminución de gases contaminantes y de efecto invernadero.

Algunas de las reservas de materia prima utilizadas en la manufactura de las baterías, como lo es el caso del litio, son de difícil acceso, debido a políticas regionales y de país, lo que puede presentar una barrera para la futura demanda de recursos necesarios para la fabricación de vehículos eléctricos. Así mismo, en los procesos de extracción se utiliza millones de litros de agua y se genera grandes cantidades de desechos, a la vez que la presencia de personal y maquinaria, aparte de causar cambios paisajísticos, puede perturbar el equilibrio ecosistémico de la región.

Es importante mitigar los impactos ambientales generados en la fabricación y reciclaje de baterías, para ello se debe tenerlas en uso por el mayor tiempo posible, sometiénolas a un segundo uso, por ejemplo, en sistemas de almacenamiento para energías renovables.

A nivel mundial el proceso de Gestión y reciclaje a gran escala, presenta varios desafíos, entre ellos unificar esfuerzos regionales para que se pueda aprovechar la mayor cantidad de residuos generados al finalizar la vida útil en el vehículo eléctrico, así como seguir estudiando los métodos de reciclaje para mitigar los impactos ambientales que se generan dentro de los procesos, causados por vertidos químicos, emisiones por quema y gasto de energía, entre otros.

La ejecución del plan es viable, ya que es acorde a los planes que se han ejecutado en la ciudad y a pesar de que se requiere de una alta inversión inicial es posible llevarlo a cabo conformando la empresa y realizando las alianzas pertinentes con el distrito y entidades privadas. Como parte de la compensación será el bienestar socio económico y ambiental de la ciudad.

Durante la investigación se encontraron muchos vacíos legales en Colombia con respecto a la gestión de desechos de baterías ion litio utilizadas en vehículos, debido posiblemente a su reciente ingreso al mercado. Se resalta la buena gestión de las iniciativas y desarrollo de programas posconsumo para residuos eléctricos y electrónicos RAEE.

Se evidencia un fácil empalme con los programas y planes de gestión de productos similares a las baterías Ion litio de procedencia vehicular, que se llevan a cabo en la ciudad de Bogotá.

Recomendaciones

Se sugiere crear una entidad de naturaleza público/privada, que en alianza con instituciones prestigiosas internacionales, realice gestión, investigación, capacitación y promoción de acciones dirigidas a la recolección, recuperación y reaprovechamiento de residuos generados en dispositivos tales como las baterías de vehículos eléctricos, los dispositivos fotovoltaicos y otro tipo de elementos electrónicos con gran potencial de reaprovechamiento; esto con el fin de mitigar los impactos negativos asociados al ciclo de vida de este tipo de dispositivos y promover actividades económicas que fomenten la circularidad en los procesos de producción y/o desarrollo tecnológico, generando así, acciones que facilitan el desarrollo económico sostenible y la responsabilidad ambiental a través de la gestión eficiente de materias primas, residuos aprovechables y el buen manejo del recurso energético.

Se recomienda desde ya, generar jornadas de sensibilización en la ciudad de Bogotá, acerca de las baterías Ion litio y de la importancia de realizar un manejo integral de este tipo de residuos.

Es importante que en el país se levante legislación sólida y complementaria a las leyes posconsumo y de tratamiento de residuos RAEE, sobre el manejo y disposición de este tipo de residuos, provenientes de baterías Ion litio usadas en carros eléctricos circulantes en el territorio.

Después de plantear y ejecutar el plan de gestión de residuos de baterías Ion litio en la ciudad de Bogotá, se recomienda estar investigando los avances e innovaciones en los métodos de reciclaje implementados por las redes de investigadores, para optarlos a mediano plazo.

Bibliografía

- ambiente, P. c. e. (S.f). *Conoce el Programa*. <https://www.pilascolombia.com/conoce>
- ambiente, S. d. (S.f-a). *Baterías plomo-acido*. <https://ambientebogota.gov.co/baterias-plomo-acido>
- ambiente, S. d. (S.f-b). *Pilas o acumuladores*. <https://ambientebogota.gov.co/programas-posconsumo-de-pilas-o-acumuladores>
- ambiente, S. d. (S.f-c). *Plan de Gestión Ambiental - PGA 2008-2038*.
<https://ambientebogota.gov.co/plan-de-gestion-ambiental-pga>
- Anla. (2011). *¿Qué es el PAPYA?* <https://www.anla.gov.co/permiso-y-autorizacion-recoleccion-pilas-y-o-acumuladores>
- Areatecnología. (S.f). *Baterías y Acumuladores*.
- Artuz, L. A., Martínez, M. S., & Morales, C. J. (2011). Las industrias curtiembres y su incidencia en la contaminación del río Bogotá. *Isocuanta*, 1(1), 43-53.
- avance, A. (2021). *Baterías de Ion Litio Automotriz - ¿Cómo funcionan en los nuevos autos?*
- Bogotá, C. d. C. d. (S.f). *Creación de empresa - Cámara de Comercio de Bogotá*.
- Bogotá, S. D. d. A. d. (S.f). *Visor Geográfico Ambiental*.
- Bravo, R. P. O. R. V. (2019). *ALGO SOBRE EL LITIO. Documento de Trabajo*.
- Bruce, P. G. (2008). Energy storage beyond the horizon: Rechargeable lithium batteries. *Solid State Ionics*, 179(21), 752-760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssi.2008.01.095>
- CAR. (S.f). *Licencia ambiental | CAR*.
- CAR | Río Bogotá. (2021).
- Chávez, E. (2021). *Unicentro tiene la electrolinera más grande y rápida del país*.

- Cisterna Barros, M. d. P. (2019). Plan de comercialización de un sistema de gestión de baterías en el mercado manufacturero de sistemas de baterías de iones litio en Alemania.
- Deslandes, A. (2020). Empresa china anuncia planta de reciclaje de baterías de litio en México.
- Díaz, J. C., & Arias, M. L. D. (2004). La contaminación por pilas y baterías en México. *Gaceta ecológica*(72), 53-74.
- Ellingsen, L. A. W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Strømman, A. H. (2014). Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 113-124.
- Eléctricos, H. y. (2022). *Asciende el precio del litio y otros materiales imprescindibles para las baterías de coches eléctricos*. @hyecom.
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/asciende-precio-litio-otros-materiales-imprescindibles-baterias-coches-electricos/20220225103857054973.html>
- enel. (2021a). Entrega de buses eléctricos SITP y patios de recarga | Enel.
- enel. (2021b). NUEVA ELECTROLINERA DE ENEL X EN UNICENTRO | ENEL.
- Enel. (2022a). Almacenamiento de energía, la clave de BESS Termozipa | ENEL.
- Enel. (2022b). *Así avanza la transición energética en Colombia* | ENEL X.
<https://www.enelx.com/co/es/historias/avances-en-transicion-energetica-en-colombia>
- enfermedades, A.-A. p. s. t. y. e. r. d. (2021). Resumen de Salud Pública: Cobalto (Cobalt) | PHS | ATSDR.
- ESPAÑA, C. (S.f). *Construction21: Introducción al Análisis de Ciclo de Vida*.
<https://www.construction21.org/espana/>
- Fonseca, J. H. (2011). Celdas, pilas y baterías de Ion-Litio una alternativa para???. *Journal Boliviano de Ciencias*, 8(22), 40-47.

García, G. (2019). *Las baterías de iones de litio, premio Nobel de Química 2019*. @hyecom.

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/baterias-iones-litio-premio-nobel-quimica-2019/20191010114619030714.html>

García, J. M. (2016). *Análisis de viabilidad de una planta de reciclado de baterías de Li-ion*.

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90759/fichero/An%C3%A1lisis+de+viabilidad+de+una+planta+de+reciclado+de+bater%C3%ADas+de+Li-ion.+Juan+Murillo+Garc%C3%ADa.pdf>

Gong, S., Ardeshiri, A., & Hossein Rashidi, T. (2020). Impact of government incentives on the market penetration of electric vehicles in Australia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102353.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102353>

Gonzalez, L. (2021). *Vida y muerte de una batería ion litio*.

<https://forococheselectricos.com/2013/05/vida-y-muerte-de-una-bateria-de-ion-2.html>

Hachim Campos, M. F. (2018). Evaluación económica de la segunda vida útil de baterías de ion litio provenientes de la electromovilidad para la agroindustria.

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., . . . Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86.

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

Hartnig, C., & Schmidt, M. (2018). Electrolytes and conducting salts. In R. Korthauer (Ed.), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications* (pp. 59-74). Springer Berlin Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9_6

HUGHES, P. (2020). *El impulso para reciclar las baterías de Ion Litio.*

<https://www.chemistryworld.com/features/the-drive-to-recycle-lithium-ion-batteries/4012222.article#/>

Ibáñez. (2011). General Motors y ABB están probando usos para las baterías del Volt usadas. *Motorpasión.*

Ibáñez. (2012). Toyota selecciona empresa recicladora de baterías para Europa. *Motorpasión.*

ICONTEC. (2007). *GESTION AMBIENTAL. ANALISIS DEL CICLO DE VIDA. PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA.* http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000127-a0991a28c5/NTC-ISO14040-2007%20Analisis_CicloVida.pdf

INFORMES INTERACTIVOS ANDEMOS. (2022).

Jin, S., Mu, D., Lu, Z., Li, R., Liu, Z., Wang, Y., . . . Dai, C. (2022). A comprehensive review on the recycling of spent lithium-ion batteries: Urgent status and technology advances. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130535.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130535>

KTRONIX. (S.f). *Baterías Niquel-Cadmio.* <http://www.ktronix.com.mx/bateriasnicd.html>

MapaInteractivo. (2014). Mapa de Bogota.

Merino, Á. (2021). El mapa de la producción de litio en el mundo.

Mesa, I. V. (2020). *Mac y Clarios Andina diseñaron programa para recolección y reciclaje de baterías usadas.* <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/mac-y-clarios-andina-disenaron-programa-para-recoleccion-y-reciclaje-de-baterias-usadas-3035085>

Minambiente. (S.f-a). *Baterías Usadas Plomo Ácido - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.*

Minambiente. (S.f-b). Programas Pos-Consumos - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Moeller, K.-C. (2018). Overview of battery systems. In R. Korthauer (Ed.), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications* (pp. 3-10). Springer Berlin Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9_1

Narins, T. P. (2017). The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry. *The Extractive Industries and Society*, 4(2), 321-328.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.01.013>

Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Ljunggren Söderman, M., & Van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1866-1890. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0788-0>

Noticia, A. i.-. (2010). *Baterias ecológicas innovadoras (Suecia)*. <https://unad-ambientalex-info.bibliotecavirtual.unad.edu.co/noticias/detalle/baterias-ecologicas-innovadoras-suecia-1118>

Noticia, A. i.-. (2011). *Argentina, Bolivia y Chile quieren crear una OPEP de litio*. <https://unad-ambientalex-info.bibliotecavirtual.unad.edu.co/noticias/detalle/argentina-bolivia-y-chile-quieren-crear-una-opep-del-litio-3404>

Palerm, A. A. S. (2015). *Estudio del Impacto en el Análisis de ciclo de vida de dar o no una segunda vida a las baterías de Vehículos eléctricos*.

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/99561/REPORT_84.pdf

Pettinger, K.-H., Kampker, A., Hohenthanner, C.-R., Deutskens, C., Heimes, H., & vom Hemdt, A. (2018). Lithium-ion cell and battery production processes. In R. Korthauer (Ed.),

- Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications* (pp. 211-226). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9_17
- Peña Ordoñez, C. (2011). Estudio de baterías para vehículos eléctricos.
- Portaluppi, A. (2021). Batx: la empresa colombiana que reutiliza baterías de vehículos eléctricos para almacenamiento - Portal Movilidad.
- publico, D. d. e. (2022). *PLAN DE ACCIÓN INTERNO – PAI MANEJO ADECUADO DE RESIDUOS SÓLIDOS*. <http://sgc.dadep.gov.co/7/3/127-PPPGR-04.pdf>
- Recopila. (S.f). *¿ Que hacemos con las pilas que nos entregas?* <https://www.recopila.org/>
- republica, C. d. l. (2013). *Ley 1972 de 2013*.
http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1672_2013.html
- Ruíz, M. G. (2015). Pasado, presente y futuro de vehiculos electricos.
- Santos, G. (2017). Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 59, 71-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.007>
- Sarigiannis, D. A., Kontoroupi, P., Nikolaki, S., Gotti, A., Chapizanis, D., & Karakitsios, S. (2017). Benefits on public health from transport-related greenhouse gas mitigation policies in Southeastern European cities. *Science of the Total Environment*, 579, 1427-1438. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.142>
- Sasanka Hewathilake, H. P. T., Karunaratne, N., Wijayasinghe, A., Balasooriya, N. W. B., & Arof, A. K. (2017). Performance of developed natural vein graphite as the anode material of rechargeable lithium ion batteries. *Ionics*, 23(6), 1417-1422.
<https://doi.org/10.1007/s11581-016-1953-1>
- Shafique, M., Rafiq, M., Azam, A., & Luo, X. (2022). Material flow analysis for end-of-life lithium-ion batteries from battery electric vehicles in the USA and China. *Resources*,

Conservation and Recycling, 178, 106061.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106061>

Sun, S., Jin, C., He, W., Li, G., Zhu, H., & Huang, J. (2021). Management status of waste lithium-ion batteries in China and a complete closed-circuit recycling process. *Science of The Total Environment*, 776, 145913.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145913>

TransMilenio. (2022). Para finales de este año, Bogotá tendrá la flota eléctrica más grande del mundo, superada solo por China.

Upme. (S.f). *Guía ambiental minera subterránea del carbón*.

http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_sub/contenid/analisis.htm

Wurm, C., Oettinger, O., Wittkaemper, S., Zauter, R., & Vuorilehto, K. (2018). Anode materials for lithium-ion batteries. In R. Korthauer (Ed.), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications* (pp. 43-58). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9_5

x, e. (2022). *Reciclaje de baterías: conoce esta iniciativa | ENEL X*.

<https://www.enelx.com/co/es/historias/guia-para-el-reciclaje-de-baterias>

Yu, D., Huang, Z., Makuza, B., Guo, X., & Tian, Q. (2021). Pretreatment options for the recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Minerals Engineering*, 173, 107218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107218>

Zhang, F., Yang, S., Du, Y., Li, C., Bao, J., He, P., & Zhou, H. (2020). A low-cost anodic catalyst of transition metal oxides for lithium extraction from seawater.

<https://doi.org/10.1039/D0CC01883J>

Zhao, G., Wang, X., & Negnevitsky, M. (2022). Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management. *iScience*, 25(2), 103744.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>