



# Reciclaje de baterías de Ion-Li, una necesidad presente y futura

**Karina Suárez Alcántara**

Unidad Morelia del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM  
Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701 Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta.  
C.P. 58190 Morelia, Michoacán. México

## Resumen

En los últimos años, se ha disparado la atención del litio (Li) como recurso natural en México. Esto es el resultado de la fuerte demanda del Li en las baterías de ion-Li, todo lo relativo a la electromovilidad (automóviles eléctricos) y a los recientes descubrimientos de depósitos de Li en México. En este trabajo se presentan datos relevantes del Li y de su principal uso como componente en las baterías de ion-Li. Sin embargo, más allá de su uso principal, se quiere alertar o hacer conciencia de la necesidad presente y futura del reciclaje del Li. Se abordan los principales retos para el reciclaje de baterías de Li. También se presenta un resumen de las principales técnicas disponibles hoy en día para el reciclaje de baterías de Li, así como algunos de sus pros y contras.

## Palabras Clave

Reciclaje de baterías, baterías de ion-Li, sustentabilidad.

Primero que nada, **¿Que es el Litio?** El litio es un elemento químico (Li) que se creó durante los primeros minutos después del

Big-Bang. Fue identificado como un elemento químico en 1817 por los químicos suecos Johan August Arfwedson y Jöns Jacob Berzelius. Era como una versión más ligera que el sodio (Na), por lo que rápidamente se le identificó como un nuevo metal alcalino. Le llamaron litio (*litium* en sueco, *lithium* en inglés) por la raíz griega *lithos* que significa roca. La roca que contenía el litio fue sacada de una mina de la isla Utö, cerca de Estocolmo, Suecia.

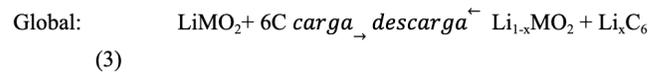
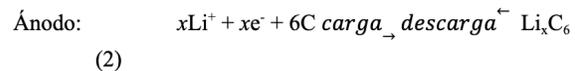
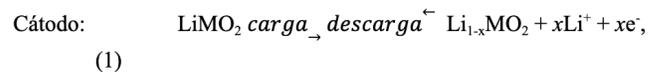
## ¿Qué son? Y ¿cómo funcionan las baterías de ion-Li?

Las baterías de ion-Li son dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía, aprovechan la movilidad e inserción reversible de iones  $\text{Li}^+$  en distintos materiales. Son recargables y tienen la mayor densidad de energía en comparación con otro tipo de baterías. Esto quiere decir que almacenan mucha energía y son de poco peso; a diferencia, por ejemplo, de los acumuladores de plomo, que pesan mucho. Hoy en día, la tecnología está fuertemente ligada a las baterías de ion-Li. Los relojes inteligentes, juguetes, celulares, laptops, automóviles

eléctricos, etc., usan baterías de ion-Li. En la Figura 1 se muestra de forma esquemática el principio de operación de las baterías de ion-Li más comunes. Como cualquier sistema electroquímico, las baterías de ion-Li cuentan con un ánodo, un cátodo y un electrolito. El ánodo es una hoja de cobre recubierta de una mezcla de grafito y aditivos. El cátodo es una hoja de aluminio cubierta con materiales que contienen litio, como el  $\text{LiCoO}_2$  (óxido de cobalto (III) litio), y aditivos. El electrolito está constituido de solventes orgánicos y  $\text{LiPF}_6$  (hexafluorofosfato de litio). El separador es un polímero no conductor eléctrico. El separador evita el contacto directo entre el ánodo y cátodo al interior de la batería, evita el corto circuito. En una forma muy resumida, el principio de operación de una batería de ion-Li es el siguiente: Durante la carga (circuito azul en la Fig. 1) hay que aplicar un cierto voltaje, es decir hay que conectar nuestra batería a la red eléctrica. Esto propicia un movimiento de electrones entre los colectores de corriente de cobre y aluminio, y simultáneamente, los iones  $\text{Li}^+$  son desprendidos de un compuesto rico en

Li como el  $\text{LiCoO}_2$ . El  $\text{Li}^+$  se mueve a través del electrolito para llegar al otro electrodo (grafito) para intercalarse en él. Durante la descarga (circuito rosa en la Fig. 1), los iones  $\text{Li}^+$  regresan al compuesto rico en Li. Durante este proceso los electrones regresan por el circuito externo, y hacen que nuestro aparato electrónico funcione. En este proceso se “libera” la energía que habíamos almacenado previamente durante la carga de la batería.

Las reacciones electroquímicas de carga y descarga de las baterías ion-Li más comunes son:



M = metales como cobalto (Co), níquel (Ni), manganeso (Mn), hierro (Fe), etc.,  $x$  = contenido estequiométrico variable. Es necesario mencionar que hay una gran variedad de materiales y, por lo tanto, las reacciones electroquímicas particulares pueden variar.

### Las baterías de ion-Li no son nuevas, ya tienen su historia

Las investigaciones en ciencia básica en materiales y electroquímica llevaron a que en 1979 se crearan las baterías de ion-Li. A tres investigadores, John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham y Akira Yoshino, se les atribuye la creación de las baterías de ion-Li. En 1991 Sony lanzó la batería de  $\text{LiCoO}_2$ /grafito, lo que inició la industrialización y

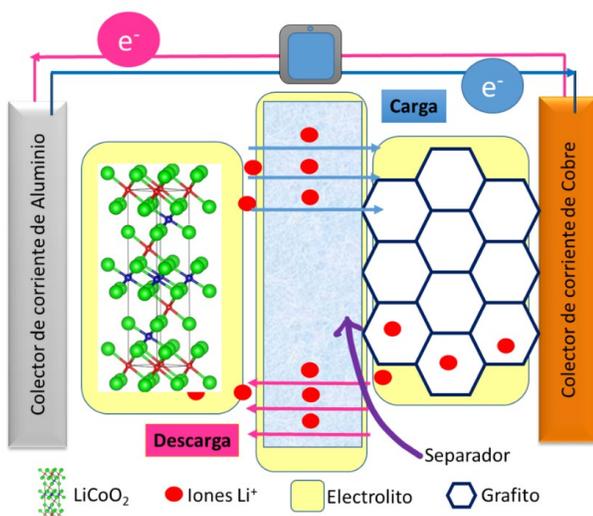


Figura 1. Representación esquemática de una batería de ion-Li

comercialización de este tipo de baterías. El número de baterías de ion-Li gastadas (de desecho) está creciendo desde ese entonces. En 2019, la Academia Sueca de Ciencias otorgó el premio Nobel de Química a John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham y Akira Yoshino.

En un principio, se puede pensar que usar baterías de ion-Li es más ecológico (por ser recargables) que las baterías desechables como las alcalinas. Sin embargo, el uso de baterías de ion-Li supone un problema medio ambiental grave: las baterías de ion-Li contienen materiales altamente contaminantes, que actualmente no se están reciclando. En el mejor de los casos, las baterías de ion-Li se confinan, en el peor de los casos, las baterías se van a los tiraderos, donde los componentes pueden generar una gran contaminación ambiental en la tierra, agua y aire.

Por otro lado, hay que tener en cuenta algunos datos importantes de la producción y uso de baterías de ion-Li [1] [2] [3]:

- Las baterías de ion-Li de desecho son consideradas como residuos peligrosos. Los materiales principales de las baterías de ion-Li son Li, metales pesados, solventes orgánicos y plásticos no reciclables. Una batería de ion-Li está compuesta aproximadamente por 5-20 % cobalto, 5-10 % níquel, 5-7 % litio, 15 % compuestos orgánicos (solventes y grafito) y 7 % plástico. La composición específica varía de acuerdo al fabricante.
- El mayor consumidor de los componentes de las baterías de ion-Li es China, por su puesto, en su papel como productor de baterías para todo el mundo.
- A la fecha, ningún tipo de baterías se fabrican en México.
- Durante el periodo 2015-2018 se observó un incremento anual del 24 % de la producción de baterías de ion-Li.
- Se espera un aumento de al menos 5 veces la producción en esta década (2020-2030), en particular por la llegada del automóvil eléctrico a baterías de ion-Li. Algunos estudios señalan incluso un incremento de 10 veces sobre la producción actual.
- El Li no se encuentra libre en la naturaleza, se encuentra principalmente en minerales o como sales de Li (en salmueras). Los lugares donde abunda el Li son: Salar de Atacama en Chile, Salar de Uyuni en Bolivia, además de China, Argentina, y Australia, principalmente.
- En México se localizaron yacimientos de litio en Sonora.
- Los procesos industriales en minas y salares usualmente se enfocan en producir  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (carbonato de litio) para ser usado como materia prima en otras industrias, como la cerámica, farmacéutica y baterías. En el caso de baterías, se deben realizar procesos químicos a partir de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  para producir óxidos de Li con Co, Mn o Fe ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMnO}_2$ , etc.).
- La vida útil de una batería de ion-Li es de entre 3 y 8 años, dependiendo de la aplicación y del grado de sustitución de la tecnología. Es decir, las baterías de ion-Li se desechan principalmente porque cambiamos nuestros aparatos, no porque dejen de funcionar propiamente. ¿Cada cuando cambias de celular?
- Al ritmo del consumo y el bajo nivel de reciclaje actual, se estima que las reservas mundiales de Li se agotarían aproximadamente para el 2050-2055.
- Se estima que solo el 3 % de las baterías de ion-Li se reciclan a nivel mundial.

- Actualmente, la mayoría de las baterías de ion-Li de desecho se confinan o se queman. Ambas opciones suponen contaminación ambiental de la tierra, agua y aire.
- Los contenidos de metales Li, Co y Ni en los desechos de baterías son más altos que en los minerales y sales de origen. Por lo que los desechos de baterías pueden ser una fuente atractiva de estos metales.
- Se estima que solamente el reciclaje de cobalto y níquel para la producción de nuevos cátodos llevaría al ahorro del 51.3 % en recursos naturales (minerales) y 45.3 % en combustibles fósiles.
- El reciclaje adecuado de las baterías de ion-Li está en desarrollo, aún no se ha encontrado un procedimiento industrial eficiente y barato.

### Principales componentes de las baterías de ion-Li y retos de su reciclaje

**Ánodo:** El ánodo es una hoja de cobre recubierta con una mezcla de grafito, aglutinantes y electrolito, como materiales más comunes. Sin embargo, en baterías antiguas pueden existir otros materiales activos de electrodo que incluyen titanato de litio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), aleaciones litio-silicio ( $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ ) o incluso Li masivo. Es decir, el reciclaje tiene que contemplar la posible mezcla de diferentes materiales. El cobre es un material comúnmente reciclable, pero en el caso de las baterías de ion-Li su reciclaje es complicado, debido a que las láminas de cobre son sumamente delgadas (más delgadas que una hoja de papel convencional) y se rompen fácilmente. Otro problema es que la mezcla de grafito y electrolito se queda pegado a la lámina de cobre. Para separar los componentes es necesario raspar,

moler, aplicar ultrasonido o quemar todo el residuo, lo que implica altos costos, uso de energía y contaminación para reciclar “un poco” de cobre. Por otro lado, como no se puede asegurar que todas las baterías de ion-Li que se someten a reciclaje estén totalmente descargadas, siempre existe Li residual en el ánodo. Este Li-residual, en términos prácticos, se pierde.

**Cátodo:** Actualmente, el cátodo consiste de una hoja delgada de aluminio que se recubre con una capa del material activo impregnado con el electrolito. Los materiales activos pueden ser fosfato de hierro litio ( $\text{LiFePO}_4$ ), óxido de manganeso litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), óxido de níquel litio ( $\text{LiNiO}_2$ ), fosfato de hierro litio ( $\text{LiFePO}_4$ ) y óxido de cobalto litio ( $\text{LiCoO}_2$ ). Siendo este último el material base por excelencia usado actualmente. Sin embargo, nuevos materiales con sustitución parcial del segundo metal se han propuesto, por ejemplo  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  [4],  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ , o  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$ . La lámina de aluminio recubierta con los materiales activos también es sumamente delgada y frágil. Esto dificulta una separación selectiva usando únicamente métodos mecánicos. Sucede que el cátodo se rompe, pero no se separan el Al y el material activo. Por este motivo es común la propuesta de usar solventes orgánicos, ácidos o bases para extraer de forma química iones de  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Co}^{+3}$ , etc. La rentabilidad económica y ecológica de este método es cuestionable, por el uso de reactivos químicos y la generación de otros residuos. Es decir, no se deben de generar más residuos de los que se está tratando de reciclar. El  $\text{LiCoO}_2$  es altamente tóxico, causa reacciones alérgicas en la piel y se sospecha de que pueda generar cáncer. El manejo de cobalto y sus iones debe ser especialmente delicado, pues son

altamente permeables en la piel, pueden causar lesiones en los pulmones y en el tracto gastrointestinal y son cancerígenos.

**Electrolito:** Los materiales de electrodo y el separador están impregnados de una mezcla de solventes orgánicos y de una sal de litio. Típicamente, el electrolito se compone de mezclas de solventes orgánicos (como carbonato de etileno, dimetil carbonato, etil-metil carbonato o dietil carbonato) con hexafluorofosfato de litio ( $\text{LiPF}_6$ ), tetrafluoroborato de litio ( $\text{LiBF}_4$ ) o perclorato de litio ( $\text{LiClO}_4$ ). El electrolito es flamable, presenta cierto grado de descomposición durante el uso de las baterías y es tóxico y altamente contaminante. El electrolito de las baterías usadas se puede recuperar por medio de tratamientos con otros solventes y/o vacío, lo que es también contaminante o necesita alto consumo de energía. La recuperación del solvente puede no suceder, es decir que simplemente “se deja evaporar” el solvente en la atmósfera. El  $\text{LiPF}_6$  es altamente contaminante, corrosivo, al contacto con el agua produce ácido fluorhídrico (HF) y óxido de fósforo (V) ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) cuando se quema. Por tanto, el electrolito de las baterías de ion-Li supone una importante fuente de contaminación del aire, aun cuando las baterías se sometan a reciclaje para recuperar metales valiosos desde el punto de vista industrial.

**Separador:** El separador normalmente está hecho de polímeros como fluoruro de polivinilideno (PVDF), polietileno (PE), polipropileno (PP) o composites. Este componente de las baterías de ion-Li es difícil de reciclar, pues se trata de una membrana sumamente delgada que se rompe fácilmente durante el desmantelamiento de las baterías y además queda contaminada por los componentes del cátodo, del ánodo y del electrolito.

Por lo que su destino comúnmente es, en el marco del reciclaje de baterías de ion-Li, la incineración. Actualmente se están desarrollando materiales más avanzados, por ejemplo, los composites de cerámicos conductores. Sin embargo, es probable que no superen el costo/beneficio de los separadores poliméricos.

**Aglutinante:** Los materiales activos se mantienen prensados a las delgadas hojas de cobre y aluminio por medio del uso de aglutinantes, el más común es el fluoruro de polivinilideno (PVDF).

**Carga remanente:** Es muy común que las baterías se desechen sin estar totalmente descargadas, esto provoca explosiones y fuegos durante el manejo y disposición de las baterías. El primer paso en el reciclaje de baterías de ion-Li debe ser realizar un proceso de descarga. Esto se hace por motivos de seguridad en los procesos siguientes, más que por recuperar algo de energía. El modo más simple de descargar una batería de ion-Li es poner los contactos de la batería en una solución de electrolitos fuertes (NaCl en agua).

### Ensamblaje de las baterías

La estructura en capas de las baterías de ion-li es bastante flexible, esto permite el ensamblaje de las baterías en forma de rollos cilíndricos o prismáticos (rectangulares) de diferente tamaño, Fig. 2 (a). Los materiales activos están prensados en tiras de aluminio y cobre, que en conjunto con el separador se enrollan (Fig. 2 (b)-(e)). En el extremo más externo se hace el contacto eléctrico de la batería. El rollo de ánodo/separador/cátodo se encuentra protegido por una carcasa metálica y a su vez todo se encuentra dentro de una carcasa de plástico. En esta última

capa se encuentran las indicaciones de uso y disposición como desecho, además de la marca comercial. En la Figura 2 se presentan las partes de una batería de ion-Li, en el proceso de desguace con el objetivo de ser reciclada.

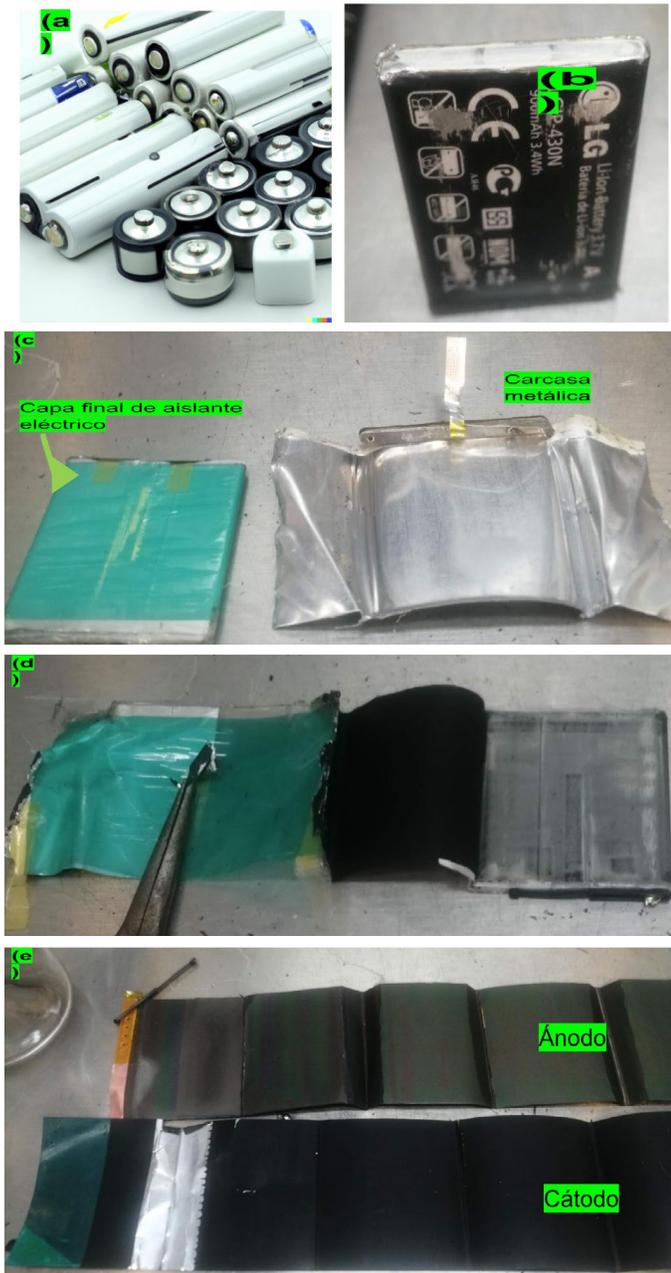


Figura 2. (a) Imagen de una batería de ion-Li generada con inteligencia artificial (DALL\*E). (b) Batería de ion-Li de un teléfono celular de desecho. (c) Capa final de aislante eléctrico y carcasa metálica. (d) Inicio del rollo ánodo/separador/cátodo. (e) Ánodo y cátodo ya separados. (b)-(e) Fotos tomadas en el laboratorio 1 del IIM-Unidad Morelia.

## El reciclaje de las baterías de ion-Li

En general, el reciclaje debe ser tanto económicamente rentable (debe generar ganancias) a la vez que debe ser amigable con el medio ambiente (no generar más residuos o necesitar gran consumo de energía). Así mismo, se deben recuperar tanto los materiales valiosos como aquellos que generan contaminación ambiental. En cuanto al reciclaje de baterías de ion-Li en específico existe poca investigación básica y pocas empresas privadas que han desarrollado sus propios procesos de reciclaje a nivel mundial. Esto último, en comparación con el número de investigaciones en nuevos materiales, aplicaciones y el nivel de comercialización de las baterías de ion-Li. Aunado a esto, el continuo avance en cuanto a materiales de electrodo hace que el reciclaje también se deba de adaptar, es decir, ir cambiando a medida del desarrollo de nuevos materiales de electrodo [5].

El reciclaje de baterías de ion-Li es un proceso complejo que involucra diversos pasos físicos, químicos o biológicos, dependientes o independientes entre sí. Algunos de ellos pueden ser realizados con ayuda de maquinaria especializada, pero también existen procesos manuales. El primer paso, después de la clasificación de baterías y la eliminación de carga residual, es remover la carcasa plástica y metálica que protege a los componentes electroquímicos. Esto se puede realizar de forma manual (desmantelar batería por batería) o bien de forma mecanizada en donde las baterías son fragmentadas en molinos especializados, y posteriormente tamizadas para separar los componentes plásticos, metálicos y polvos (Fig. 3).



Figura 3. Productos del proceso de obtención de polvos del ánodo y cátodo de baterías de ion-Li en el IIM-Unidad Morelia. (a) y (b) ánodos y cátodos cortados manualmente. (c) y (d) polvos de materiales electroactivos recuperados del ánodo y cátodo.

Aquí es necesario hacer un paréntesis y hablar del reciclaje de otro tipo de baterías. Entre las baterías ampliamente utilizadas y recicladas son los acumuladores de plomo (las baterías de los carros) y las baterías alcalinas. El proceso de reciclaje de baterías de plomo está bastante bien estandarizado y es usado a nivel industrial, muchas veces promovido por las mismas empresas que fabrican los acumuladores, talleres automotrices y a veces hasta el talachero de la esquina. El desguace puede ser manual o mecanizado, separando las placas de plomo (Pb) para ser re-fundidas en nuevas placas de Pb. Hay que tener cuidado con el ácido que estas baterías contienen y no contaminar el ambiente con Pb residual. El ácido se debe neutralizar. El proceso de reciclaje de este tipo de baterías es sencillo debido a que la estructura de las baterías de Pb es sencilla y masiva (son grandes bloques de Pb). Es decir hay una diferencia abismal en comparación con las baterías de ion-Li en cuanto a estructura y tamaño de los componentes. En cuanto a las baterías alcalinas, estas normalmente se muelen y son tamizadas para separar plástico y el metal de la carcasa. El material (polvo) remanente está

constituido de zinc (Zn), manganeso (Mn) y potasio (K); elementos que pueden ser usados como abono de cultivos como el maíz. O bien pueden ser separados químicamente y ser usados en otras industrias. Esto quiere decir que hay diferentes objetivos y avances tecnológicos para el reciclaje de los distintos tipos de baterías.

Para el caso de las baterías de ion Li, la recuperación se centra en el Li, Co y Ni. En segundo lugar está la recuperación de grafito (C). La idea principal es separar esos elementos, concentrarlos y finalmente purificarlos para ser reutilizados en nuevas baterías. La Tabla 1 presenta los principales procesos físicos, químicos y biológicos usados o propuestos para ser usados en el reciclaje de baterías de ion-Li. Es de notar que recientemente se ha propuesto el uso de ciertas bacterias para realizar la disolución, oxidación y captura selectiva de los metales como Fe, Co o Ni. Las desventajas de este proceso es que es lento y al final hay que pirolizar (quemar) la biomasa para quedarse con escoria rica en Fe, Co o Ni.

### Regulaciones e infraestructura para el reciclaje en México

Hasta donde se investigó, México no cuenta con una normatividad específica para el reciclaje de basura electrónica, incluidas las baterías de ion-Li [6] [7]. Se encontraron normas que clasifican a las baterías de ion-Li como residuos de manejo especial y que estas deben ser confinadas en instalaciones adecuadas. Cabe mencionarse que el confinamiento no resuelve problemas de contaminación ni genera beneficios económicos por el aprovechamiento de los residuos. Por otro lado, sí está surgiendo un mercado (informal) para la compra de basura electrónica en México. Los mayores pro-

<i>Físicos</i>	<i>Químicos</i>	<i>Biológicos</i>
Separación manual de los componentes. Por ejemplo: separación de carcasas de plástico y metálicas.	Ataque (disolución) con ácidos o bases. Preferentemente se utilizan ácidos fuertes ( $H_2SO_4$ o HCl) con o sin presencia de otros aditivos como el peróxido de hidrógeno. También existe la disolución con álcalis fuertes. Una alternativa es el uso de ácidos naturales como el cítrico, que además de disolver, encapsulan los metales de interés Co y Ni.	Uso de bacterias y/u hongos que "comen" a los metales, es decir los concentran. Posterior pirolisis.
Separación mecánica: molienda mecánica de los componentes de interés (primordialmente el cátodo) y posterior tamizaje (en tamices vibratorios).	Extracción con agentes lixiviantes, coagulantes o secuestrantes * de iones metálicos y tratamientos posteriores como la calcinación o pirolisis. * Algunos de estos materiales son selectivos a iones metálicos y están comercialmente disponibles.	
Tratamiento térmico: Después de la molienda u otros procesos, el material resultante se puede pirolizar para eliminar todos los compuestos orgánicos y quedar con escoria rica en Co y Ni. Pero no de Li, pues se pierde en este proceso. Este proceso es caro por el consumo de energía.	Precipitación química: Se refiere a la adición de reactivos químicos para la formación de precipitados del material de interés, por ejemplo agregar $CO_3^{2-}$ al $Li^+$ para formar $Li_2CO_3(s)$ . Esto supone añadir el costo de los reactivos químicos y la generación de algunos desechos.	
Agitación y/o ultrasonido: Después de agregar, agua, ácidos, bases o solventes (procesos químicos), la mezcla se somete a agitación y/o ultrasonido para mejorar la separación de los componentes activos de las láminas de Cu y Al. Este paso puede ser seguido de tratamiento químico, electroquímico o biológico.	Procesos electroquímicos: En muchos casos, los procesos electroquímicos pueden reducir en gran medida la generación de desechos, como en el electro-refinado de metales o la electrodiálisis. Estos procesos tienen asociado el costo de la energía eléctrica necesaria para realizar los procesos electroquímicos, pero se compensa por la eficiencia de los procesos.	

Tabla 1. Procesos físicos, químicos y biológicos usados o propuestos para ser usados en el reciclaje de baterías de ion-Li.

blemas identificados en ambos puntos son la inexistencia del confinamiento adecuado para todo el volumen de residuos generados, así como la falta de regulación de las pequeñas empresas de reciclaje formales o informales. Las soluciones son transversales, pues involucran invertir en estudios de ciencia básica para generar procesos productivos de reciclaje, así como una legislación específica en el tema que regule dichos procesos.

## Perspectivas

La demanda de baterías ion-Li crecerá exponencialmente en la próxima década, esto va a generar una alta demanda metales como Li, Co, Ni, Cu y Al. Por otro lado, las baterías de ion-Li constituyen un nuevo problema medioambiental, son necesarios procesos de reciclaje económicamente y medioambientalmente viables. El reciclaje de baterías de ion-Li es un proceso difícil que involucra

muchos retos. Las investigaciones básicas y aplicadas son todavía insuficientes para resolver el problema. Es necesario tomar acción en el asunto y se deben de implementar investigaciones básicas y aplicadas para el reciclaje de baterías de ion-Li.

## Agradecimientos

Se agradece al proyecto UNAM-DGAPA-PA-PIIT [IN200122] Nano-confinamiento de materiales de almacenamiento de hidrógeno.

## Referencias

- [1] [https://bacanoralithium.com/sonora\\_lithium\\_project/default.aspx](https://bacanoralithium.com/sonora_lithium_project/default.aspx).
- [2] P. Greim, A.A. Solomon, C. Breyer, Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation, *Nat. Commun.* 11 (2020) 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18402-y>.
- [3] J. Ordoñez, E.J. Gago, A. Girard, Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60 (2016) 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.363>.
- [4] V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari, G. Salitra, D. Aurbach, Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review, *Energy Environ. Sci.* 4 (2011) 3243. <https://doi.org/10.1039/c1ee01598b>.
- [5] S.J. Gao, W.F. Liu, D.J. Fu, X.G. Liu, Research progress on recovering the components of spent Li-ion batteries, *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Mater.* 37 (2022) 435–460. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(22\)60605-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(22)60605-X).
- [6] [https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU\\_18-008.pdf](https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-008.pdf).
- [7] [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/300512/Gu\\_a\\_para\\_el\\_consumo\\_sustentable\\_de\\_pilas.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/300512/Gu_a_para_el_consumo_sustentable_de_pilas.pdf).