



PREMIO NOBEL DE QUÍMICA 2019: BATERÍAS ION-LI

Claudio Tapia,¹ Miguel Ángel Oliver-Tolentino,^{1,2} Ignacio González¹ y Guadalupe Ramos-Sánchez^{1,2,3}

Resumen

El premio Nobel en química del año 2019 fue otorgado a tres personas, en partes iguales, por el mismo motivo: el desarrollo de la batería de Ion-Litio. El desarrollo de esta tecnología ha traído consigo una serie de avances significativos, tanto en relación al modo en que la energía puede ser almacenada por algunos materiales, a la química de materiales y, ciertamente, a la manera en que somos capaces de concebir el almacenamiento de energía.

Este artículo trata sobre la importancia de las contribuciones de estos científicos, el funcionamiento y las ventajas comparativas de estos sistemas electroquímicos, y las oportunidades y desafíos actuales en relación al almacenamiento de energía.

Palabras clave

Materiales de Intercalación, Celda Electroquímica, Celda Ion-Li, Almacenamiento de Energía; Premio Nobel de Química.

Nobel Prize in Chemistry 2019: Ion-Li batteries

Abstract

In the year 2019, the Nobel Prize in Chemistry was awarded to three people for the same reason: the development of Ion-Lithium batteries. The development of this technology also brought about a series of relevant advances in regards to the mechanism of energy storage by some materials, chemistry of materials and, certainly, the way in which we conceive energy storage.

This article highlights the relevance of their work, the operation principles and advantages of Li ion batteries, and the opportunities and challenges in the energy storage field.

Keywords

Intercalation materials, Electrochemical cell, Li-Ion Cell, Energy Storage, Chemistry Nobel Prize

¹ Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México.

² Cátedras Conacyt.

³ Departamento de IPH, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México.

Sociedad y Energía

La historia de la humanidad, habitualmente, es narrada como una serie de hitos relacionados con personajes y sus acciones, pero esta no es la única posibilidad. Si se considera hilo conductor, la relación que la especie humana ha establecido con la energía, es posible apreciar una sucesión de transiciones energéticas a lo largo del tiempo, orientadas por el acceso a una diversidad mayor de fuentes de energía y a densidades energéticas cada vez mayores¹. Durante un período muy extenso, desde donde se quiera identificar la aparición de los primeros homínidos hasta la mayor parte de la Edad Antigua, se dependió exclusivamente de la fuerza muscular para la ejecución de trabajo². Es muy relevante destacar que el desarrollo de la agricultura significó un incremento en la cantidad de potencia (trabajo/tiempo) alcanzable, ya que permitió que una mayor cantidad de fuerza de trabajo (humana y animal) se alimentara en un espacio acotado. En este contexto, aumentar la cantidad de potencia requería, literalmente, poner a alguien más a jalar de una cuerda.

Posteriormente, gracias a la invención de máquinas fue posible acceder a niveles de potencia mayores. Las primeras de estas máquinas, cuyas versiones iniciales corresponden también a la Edad Antigua, fueron molinos de agua y de viento. Por más de un milenio, este fue el panorama energético de la humanidad.

El escenario cambió radicalmente desde el siglo XVIII, con la invención de la primera máquina a vapor. Lo relevante de este suceso es que, por primera vez, se dispone de una máquina cuya autonomía depende completamente del suministro de combustible. A esta máquina siguieron otras, como el motor de combustión interna, que fueron capaces de realizar transformaciones energéticas de combustibles que contenían más energía por unidad de peso o volumen. El incremento en órdenes de magnitud de los niveles de potencia alcanzable se debe a la invención de las máquinas a combustible (Figura 1).

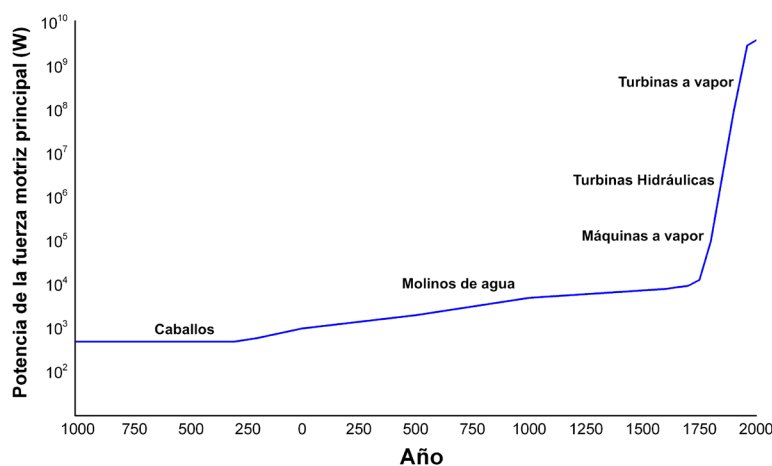


Figura 1. Evolución de la potencia de la fuerza motriz predominante (Adaptado de Smil, 2004).

La problemática de proveer energía en un tiempo y espacio determinado se ha abordado, principalmente, usando dos estrategias: a) encapsulando máquinas y la energía necesaria para su operación en unidades móviles (automóviles, aviones, teléfonos, computadores) y, b) creando redes de distribución que llevan energía hasta el lugar donde se requiere usar o redistribuir (oleoductos, red eléctrica). En el caso de las unidades móviles, la

¹ El principal expositor de este enfoque es Vaclav Smil. A modo de lectura introductoria recomendamos: <http://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-2004world-history-energy.pdf>

² Entendido de acuerdo a su acepción física.

autonomía que pueden alcanzar está restringida por la cantidad de energía que les es posible transportar mientras siguen siendo funcionales, es decir, dentro de un volumen de almacenamiento acotado. La única manera en que estas unidades pueden aumentar su autonomía de funcionamiento, sin modificar su operación, es almacenando una cantidad mayor de energía dentro de ese mismo volumen. Aquí radica la importancia del trabajo de Goodenough, Whittingham y Yoshino: las baterías de Ion-Li permitieron alcanzar densidades de almacenamiento de energía adecuadas para la operación de unidades móviles usando energía electroquímica.

En la actualidad, la relevancia que tienen los dispositivos que utilizan baterías de Ion-Litio en la vida de las personas, queda bastante clara con sólo una pregunta: ¿Que fracción del día no estamos conectados a una o más redes?

Sólo en materia de comunicaciones, la penetración de baterías de Ion-Li es enorme: Hoy en día hay más líneas de telefonía móvil que habitantes en el planeta (Broadband Commission, 2019, p. 2) y, a nivel mundial, más del 40% de la población usa un 'teléfono inteligente'³. Pero es posible encontrar este tipo de batería en una gran variedad de otros dispositivos: "notebooks", "tablets", dispositivos médicos, vehículos (de "scooters" a camiones), luminarias, juguetes, herramientas, entre mucho otros.

Cerramos la introducción remarcando el hecho de que, al mismo tiempo que la densidad energética y la potencia alcanzada aumentaban, la acumulación de emisiones de los combustibles usados para ello (con sus correspondientes procesos de transformación energética) se ha convertido en un problema de tal magnitud que incluso se considera que la continuidad de la especie humana sobre el planeta está en riesgo.

En este escenario de futuro incierto, el rol de las fuentes de energía renovables es crucial; sin embargo, la intermitencia que caracteriza a prácticamente todas estas fuentes de energía requiere encontrar soluciones para la asincronía entre los momentos de generación y consumo. Una de ellas es el almacenamiento. El desarrollo de mejores baterías de Ion-Li, y de otras modalidades de almacenamiento de energía, será trascendental en los años venideros.

Funcionamiento de las celdas⁴ electroquímicas

Las celdas electroquímicas son casi tan antiguas como la misma ciencia electroquímica, datan de los tiempos de Volta y Galvani (Chang, 2011; Scrosati, 2011). El principio de su funcionamiento se encuentra en los procesos de transferencia de carga entre un conductor iónico y un conductor electrónico; es decir, la transformación de energía química en eléctrica.

Por ejemplo, consideremos dos sistemas separados electrónicamente e iónicamente el uno del otro, cada uno de ellos compuesto por un metal y su forma iónica (Zn^0 y Zn^{+2} , en un caso, Cu^0 y Cu^{+2} , en el otro). Que los sistemas se encuentren separados significa que la probabilidad de que haya transformación de especies de su forma metálica a iónica, o viceversa, es prácticamente nula; sin embargo, existe la posibilidad (que depende completamente de la naturaleza del metal) de que esta transformación ocurra. A esta tendencia se le denomina potencial estándar de reducción o potencial estándar de Nernst, y puede ser entendido como la tendencia de un sistema a adquirir electrones y reducirse.

³ Bankmycell (2020). How many phones are in the world? Disponible en <https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world>

⁴ En electroquímica se denomina 'celda electroquímica' a una unidad de almacenamiento de energía, y 'batería' a un arreglo de 'celdas', conectadas en serie o en paralelo. Esta es la manera en que usaremos ambos términos a lo largo del documento

Para el ejemplo, los potenciales estándar de reducción de ambos sistemas son:



Al poner en contacto estos sistemas, el que tiene el potencial de reducción mayor (Cu) tenderá a recibir electrones (se reducirá) y el sistema con potencial menor (Zn) tenderá a ceder electrones (se oxidará). El potencial medido será cercano a 1.1V y, de acuerdo a la ecuación de Nernst, la reacción se producirá de manera espontánea (ΔG negativo).

Si se permite el paso libre de electrones e iones, debido a que la reacción es espontánea, se generará un flujo de electrones (corriente eléctrica) y las especies se transformarán hasta que alguna de ellas se agote, o hasta que el sistema alcance un estado de equilibrio electroquímico (diferencia de potencial nula).

En este tipo de celdas tiene lugar una transformación energética: se transforma energía química (energía contenida en las especies químicas) en energía eléctrica. Esta transformación, en términos termodinámicos, sucederá de manera natural en una dirección. Pero también es posible ir en la dirección contraria, forzando un cambio de polaridad en los electrodos (mediante de la aplicación de un potencial mayor), hasta recuperar el estado original del sistema.

Es por esto que las celdas electroquímicas son consideradas como sistemas reversibles de transformación de energía. Los factores que determinan la energía almacenable son la cantidad de reactivos originalmente presentes y la disponibilidad de rutas de acceso (iónicas y electrónicas) para acceder a cada átomo de los reactivos. Por otra parte, la potencia alcanzable dependerá de la velocidad a la que se pueda llevar a cabo la reacción (corriente) y el potencial del sistema. Finalmente, que el sistema sea total o parcialmente reversible queda determinado por la presencia de reacciones secundarias o parásitas.

Los parámetros del desempeño de una celda dependen completamente de la combinación entre materiales de los electrodos, el electrolito seleccionado, y las reacciones químicas relacionadas con esas elecciones. De entre todos los pares conocidos de conductores iónicos, especies de electrodo, y sus reacciones asociadas; hay una combinación única que ha permitido un incremento sustantivo en los niveles de potencia y energía específica alcanzables: la celda de Ion-Li.

¿Por qué litio?

El litio se encuentra en la segunda fila del Grupo 1 de la Tabla Periódica de elementos, es decir, es el tercer elemento más liviano de los conocidos. Su radio atómico es pequeño, y su energía de ionización es baja. Todas estas características inciden favorablemente en el desempeño de los sistemas de almacenamiento de energía que lo utilizan:

- Por ser el catión alcalino de menor peso molecular, la densidad de energía que se pueda obtener en un dispositivo electroquímico, será mayor en comparación con cualquier otro ion.
- Gracias a que su radio atómico es pequeño, la movilidad de esta especie es mayor.

- Que su energía de ionización sea baja implica que su potencial de reducción estándar tenderá a ser más negativo.

Explicación simple del funcionamiento de una celda de Ion-Litio

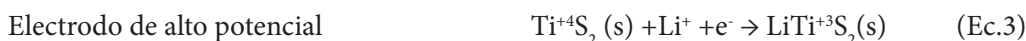
La celda de Ion-Li no hubiera sido posible sin el desarrollo de materiales de intercalación. En los 70s, Stanley Whittingham⁵ investigaba una serie de compuestos con propiedades magnéticas especiales, uno de ellos era el TaS_2 (Whittingham, 1974, 1976). Este material es un compuesto laminar: las unidades de TaS_2 forman láminas entre las cuales (espacio interlaminar) es posible alojar especies iónicas de manera espontánea, afectando mínimamente la distancia entre ellas (distancia interlaminar). El ion intercalado no cambia su estado de oxidación al alojarse en la cavidad, pero sí el ion metálico dentro de la red, en este caso el tántalo. Lo especial de este proceso es que permite, de manera sencilla y reversible, que iones se difundan dentro de una estructura sin causar grandes cambios de volumen.

Considerando que el que el Ta es un elemento escaso, que el Ti puede formar compuestos laminares similares y que el Li tiene el potencial de reducción estándar más negativo; Whittingham propuso una primera versión de celda de Litio. Esta consistió en: un electrodo de TiS_2 (sobre un colector de corriente metálico), un electrodo de litio metálico, y un separador impregnado de un electrolito orgánico que evitaba el contacto eléctrico entre los electrodos. Esta primera versión de celda de Li alcanzaba a generar un potencial cercano a 2 V. Cuando tiene lugar la intercalación de Li^+ en $Ti^{+4}S_2$ ocurre un cambio en el estado de oxidación del Ti a $LiTi^{+3}S_2$; es decir ocurre una reducción (Ec.3). En el proceso de carga, el electrodo que tiene $LiTiS_2$ ahora se oxida (Ec.3 en sentido inverso). Por otro lado, en el electrodo de Litio metálico, ocurren reacciones de oxidación de Li^0 a Li^+ (disolución de Li, Ec.4) y de reducción (depósito de Li, Ec.4 en sentido inverso) simultáneamente a las reacciones que ocurren en el electrodo de TiS_2 (Ec.3).

El nombre celda de Ion-Li proviene del hecho que el elemento litio siempre se encuentra en su forma iónica. En este caso, debido a que la celda contiene litio en estado metálico, es impreciso hablar de Ion-Li. Pese a esto, el término se utiliza indistintamente en ambos casos.

En este tipo de sistemas, denominar como cátodo o ánodo a un electrodo específico puede dar lugar a controversias. La IUPAC ha asignado el nombre de cátodo al electrodo donde se lleva a cabo la reducción, y ánodo a aquel donde se lleva a cabo la oxidación (sin importar si la celda se encuentra en descarga o se carga). En estos sistemas, dependiendo del estado de la celda (carga o descarga), en cada electrodo tienen lugar procesos de oxidación o reducción. Para evitar controversias, a lo largo del documento utilizaremos los términos electrodo de alto potencial y electrodo de bajo potencial.

Reacciones en la batería de Whittingham durante la descarga:



En una celda de Ion-Li, el proceso de descarga ocurre de manera natural. Cuando se cierra el circuito de los terminales de la celda, ocurren las reacciones de transferencia de carga y

⁵ Biografía disponible en: <https://www.britannica.com/biography/M-Stanley-Whittingham>

entonces tiene lugar un flujo de electrones: por cada electrón que sale del electrodo de bajo potencial (el electrodo de litio metálico) un ion de litio se desplazará hacia el electrodo de alto potencial. Durante el proceso de carga, la diferencia de potencial impuesta desde la fuente de energía fuerza a los iones de litio a romper las uniones con el material del electrodo de alto potencial y a desplazarse hasta el electrodo de bajo potencial donde, en concordancia con su nuevo estado energético, formarán uniones hasta alcanzar un estado de equilibrio electroquímico diferente al de la descarga.

A pesar de que de que esta versión de celda ya presentaba ventajas claras en relación a los sistemas de almacenamiento existentes en esa época, algunas de sus desventajas eran evidentes: bajo voltaje, poca reversibilidad y problemas de seguridad (de causa desconocida en ese tiempo); las cuales requerían ser solucionadas para considerar su uso generalizado. Una serie de factores económicos, políticos y científicos incidieron en que este tipo de batería nunca fuera comercializada.

Posteriormente, John B. Goodenough⁶ siguió investigando este tipo de sistemas, percatándose de una característica fundamental. De acuerdo con la ley de Nernst, el cambio en energía libre de Gibbs durante el proceso de intercalación es proporcional al potencial y, por lo tanto, un sistema de intercalación que contenga un metal de transición y azufre (TiS₂) no provoca una interacción muy fuerte entre el ion intercalante y el material de intercalación y, por lo tanto, el voltaje obtenido es muy bajo. La propuesta de Goodenough para alcanzar potenciales más altos fue utilizar un ion metálico y oxígeno. La mayor electronegatividad de oxígeno, comparada con la de los compuestos de azufre, debería ocasionar una mayor energía de interacción. De entre las diferentes posibilidades de óxidos metálicos, el LiCoO₂ permitía alcanzar potenciales cercanos a 4V y su distancia interlamina seguía siendo favorable para la entrada/salida de Li⁺ de forma reversible (Mizushima et al, 1980).

Este descubrimiento no solo significó una mejora en el desempeño de la batería (mayor densidad de energía y mayor potencia al duplicar el voltaje de operación), también es relevante como metodología de control de las propiedades de la batería: i) *modificar las propiedades de interacción con el Ion-Li permite controlar el voltaje de la celda* y, ii) *las modificaciones a la estructura que favorecen el movimiento del litio en su interior se traducen en incrementos en la densidad de corriente que el sistema es capaz de alcanzar*. Además, una ventaja adicional de proponer materiales que ya contienen Li en su estructura es que el material se adiciona en su forma descargada y, por lo tanto, hay menos problemas de reactividad durante la fabricación de la celda.

Para la variante de electrodo propuesta en este sistema, durante la descarga:



Ahora bien, a pesar de todos estos avances, la celda seguía teniendo algunos problemas relacionados con el uso de electrodos de Li metálico. Esto afectaba de manera importante las condiciones de seguridad en la operación de la celda. Específicamente, este riesgo se debía a la formación de crecimientos irregulares (dendríticos) en el electrodo de Li metálico. Estas dendritas crecían de manera descontrolada durante el transcurso de los ciclos de carga y de descarga y, cuando atravesaban el separador y alcanzaban el otro electrodo, producían un corto circuito.

⁶ Biografía disponible en: <https://www.britannica.com/biography/John-B-Goodenough>

Al respecto, es importante recordar que las tres condiciones para que exista un riesgo de explosión/combustión son: la presencia de un combustible (en este caso el compuesto orgánico del electrolito), la presencia de oxígeno (contenido en el material activo y que puede ser liberado a altas temperaturas o a altos voltajes), y una fuente de calor. Cuando llega a producirse un corto circuito en una batería de este tipo, se promueve un incremento súbito de temperatura y, por lo tanto, una cadena de eventos (“thermal runaway”) que ocasiona la explosión de la batería.

Una vez que se determinó que el electrodo de Li metálico causaba estos problemas, fue necesario encontrar un sustituto con un potencial similar. Debido a que el voltaje de operación está relacionado con la interacción entre el Li y el material de intercalación, se consideró plausible que una interacción más débil (de fuerzas de dispersión, por ejemplo) pudiera lograrse usando un material alternativo. Los materiales grafiticos presentan esta capacidad y, además, tienen una estructura laminar, están unidos por fuerzas de dispersión débiles, y su distancia interlaminar es muy similar al tamaño iónico del litio. En los 80's, Akira Yoshino⁷ descubrió que es posible intercalar iones de litio en este tipo de materiales (Yoshino et al, 1987), obteniendo un voltaje muy bajo (similar al de litio metálico). Yoshino también se dio cuenta de que, aunque los materiales grafiticos pueden tener diferentes morfologías, funcionalidades y tamaños, sólo algunos de ellos eran capaces de funcionar reversiblemente para la intercalación de litio a bajos voltajes (especialmente aquellos provenientes del coque de petróleo)

Para la variante de electrodo propuesta por Yoshino, durante la descarga:



Esta última modificación dio lugar a una celda completamente funcional, conformada por un electrodo de LiCoO_2 (con altos potenciales para la intercalación de litio y alta capacidad de almacenamiento), y otro que contiene un material a base de grafito (con bajos potenciales y alta capacidad).

En el sistema resultante, el litio nunca se encuentra en su forma metálica, sólo en forma iónica tanto dentro de los electrodos como en el electrolito. Esos iones se desplazan entre los electrodos durante los ciclos de carga y descarga de la batería. A un sistema con estas características es posible llamarle de manera rigurosa celda Ion-Li y, a un arreglo de estas celdas, batería Ion-Li (Figura 2).

Aparición de Irreversibilidades

Hasta este punto, la explicación proporcionada permite entender de manera simple el modo en que funcionan estos sistemas, pero no aborda los procesos que ocurren durante los ciclos de carga/descarga que promueven la aparición de irreversibilidades. Para comprender esto, es necesario describir los fenómenos físicos y químicos que afectan a los iones litio durante los procesos de intercalación.

Lo primero que es necesario considerar en estos sistemas es que, si se usa como electrolito una sal disuelta, se presentan macroscópicamente dos interfases sólido/líquido entre los electrodos y el electrolito. Esto impone una condición a los iones litio: deben presentar una buena movilidad a través de una fase sólida y líquida.

⁷ Biografía disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Yoshino-Akira>

Como ya se mencionó, el litio es uno de los elementos de menor radio iónico. Por esta razón es esperable que pueda difundirse en la estructura cristalina de los materiales empleados como electrodos; sin embargo, debido a su pequeño radio iónico, también presenta un alto poder polarizante, que se manifiesta como un incremento en las interacciones electrostáticas que tiene con la estructura del material de los electrodos. Estas interacciones dan lugar a diferencias en la cantidad de iones litio que participan en los procesos de inserción/deserción y, a medida que algunos iones quedan atrapados entre las láminas de los electrodos, la capacidad de almacenamiento de energía de la celda disminuye.

Debido a la baja conductividad electrónica que presentan los materiales de intercalación, es necesario mezclarlos con partículas de carbono conductor y un aglomerante. Si además de lo anterior se considera el fenómeno de percolación, solo es posible que los electrodos empleados presenten espesores pequeños. Esto es fundamental para lograr que los iones litio puedan difundir e intercalarse y desintercalarse sobre todo el material activo, alcanzando cada uno de los sitios de intercalación disponibles. Nuevamente, si los iones litio quedan atrapados en la estructura del material de los electrodos, estos dejan de participar de los procesos de carga y descarga y la celda pierde capacidad.

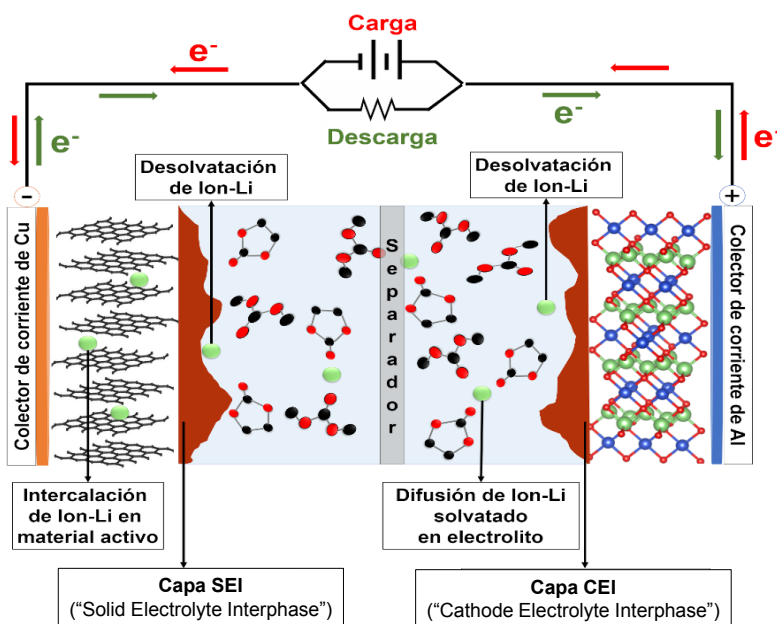


Figura 2. Esquema representativo de los componentes de una celda Ion-Li y descripción de la trayectoria de especies dentro de la misma.

Por otra parte, los iones litio que se encuentran en el electrolito se estabilizan gracias a la formación de una esfera de solvatación pero, debido a la alta acidez de Lewis que este ion presenta, su radio solvatado (también conocido como radio de Stokes) se incrementa considerablemente. Esto explica el alto valor de energía de desolvatación que tiene el Ion-Li (215.8 KJ/mol en Policarbonato, por ejemplo).

Además, la estabilidad de electrolito es fundamental para el correcto funcionamiento de la celda a lo largo de los ciclos de carga/descarga. Es por esto que el voltaje de operación de la celda se ajusta a la ventana de potencial en que el electrolito no sufre procesos de oxidación o reducción. Estas reacciones producen la degradación del electrolito, y dan lugar a la formación de compuestos químicos que pueden llegar a comprometer la seguridad de operación del dispositivo.

Debido a que el Ion-Li debe ser capaz de difundir en el electrolito y en el material activo, uno de los aspectos más relevantes a investigar y mejorar son los fenómenos que ocurren en la interfase electrodo/electrolito. Durante la inserción del Ion-Li en la estructura del material ocurre la desolvatación y, en la deserción, la solvatación del ion vuelve a ocurrir. Estos fenómenos involucran cambios energéticos que, junto con la transferencia de carga en los electrodos, inducen reacciones que promueven la formación de una capa de compuestos (como LiF y carbonatos insolubles de litio) sobre la superficie del electrodo. Esta capa va creciendo conforme el número de ciclos aumenta, formando otras especies químicas insolubles tales como Li_2O o LiO-R . De la composición, propiedades y estabilidad de esta capa dependen aspectos críticos para el desempeño de la celda, como su eficiencia, ciclabilidad y seguridad. El conocimiento que se tiene actualmente sobre la formación de esta capa es insuficiente, y su grado de avance es mayor del lado del electrodo de bajo potencial (usualmente denominado como SEI, "solid electrolyte interfase") que del de alto potencial. Lo que sí se sabe es que el objetivo perseguido es lograr que estas capas permitan la difusión de los iones de litio al mismo tiempo que impidan el transporte de electrones (aislante eléctrico) (Gauthier, 2015).

En general, aún no están satisfechas las expectativas en relación a la cantidad de energía que las baterías Ion-Li deben ser capaces almacenar. Este problema se ha abordado desde el punto de vista de las propiedades de los materiales y la ingeniería de sistemas electroquímicos. Es por esta razón que existe gran interés en el aumento de la capacidad de los electrodos, el incremento del voltaje de operación de las celdas y la posibilidad de que los procesos de carga/descarga ocurran más rápidamente, sin comprometer la reversibilidad del sistema.

El futuro del almacenamiento de Energía

Los avances logrados en las características operativas de las baterías han sido tan significativos, que este tipo de sistema de almacenamiento ha sido el motor para la transformación de la industria automotriz a vehículos eléctricos. Sin embargo, aún existe una variedad de problemas por resolver y desafíos: 1) la abundancia y disponibilidad geográfica de litio (Galeano, 2011), 2) las dificultades de extracción y el gasto energético y de recursos asociados y, 3) los problemas ambientales que surgen de la fabricación de las baterías. Actualmente la fabricación de una batería de 100 kWh tiene una huella de CO_2 equivalente a la producida por un coche de gasolina durante 8 años (Andreu, 2019).

En la actualidad, México impone restricciones a la importación de litio y baterías portátiles debido a los problemas de seguridad que presenta su transporte. Sin embargo, existen grandes expectativas en relación a futuras inversiones para la explotación de litio mexicano, debido a tres yacimientos de litio que se encuentran en etapa de exploración en Baja California, San Luis Potosí-Zacatecas y Chihuahua-Sonora. Es de particular importancia el último mencionado, con un potencial de extracción estimado en 243 millones de toneladas (Nájar, 2009).

Las capacidades y el conocimiento actual de la academia en México, en relación al litio y el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía electroquímicos, permiten pensar de manera realista en el desarrollo nacional de este tipo de tecnologías. Los aspectos a investigar siguen siendo muchos, y el mundo del almacenamiento no se acaba en el litio. Hay expectativas en torno a que baterías Li-aire y Li-azufre logren

alcanzar densidades energéticas similares a las obtenidas con combustibles fósiles, y también sobre el futuro del almacenamiento estacionario con base en baterías de Ion-Na. Ante estas circunstancias se abre un escenario en el que México podría pasar de ser un país meramente extractor de minerales a uno que cree las condiciones para el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía.

Referencias

- Andreu, M. (2019). El litio: el dilema de la movilidad eléctrica. 2019, de La Vanguardia. (url: <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20190408/461524062685/litio-dilema-coches-electricos-baterias.html>)
- Broadband Commission, UN (2019). The State Of Broadband 2019' Report Highlights (url: <https://www.broadbandcommission.org/Documents/SOBB-REPORT%20HIGHLIGHTS-v3.pdf>)
- Chang, H. (2011). How historical experiments can improve scientific knowledge and science education: The cases of boiling water and electrochemistry. *Science & Education*, 20(3-4), 317-341. (url: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11191-010-9301-8>)
- EPA (2013) Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. Report. (url: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/lithium_batteries_lca.pdf)
- Flexer, V. et al. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment* 693, Elsevier, 1188 – 1204. (url: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>)
- Gauthier, M. et al. (2015). Electrode–Electrolyte Interface in Li-Ion Batteries: Current Understanding and New Insights, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Volume 6, Issue 22, Pages 4653 – 4672 (url: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.5b01727>)
- Galeano, E. (2011). LITIO, la paradoja de la abundancia. 2011, de Red de Asistencia Jurídica contra la Megaminería. (url: <https://opsur.files.wordpress.com/2011/12/litio-para-opsur.pdf>)
- Gregersen. E. (2019). John B. Goodenough. Enero 13, 2020, de Encyclopædia Britannica, inc. (url: <https://www.britannica.com/biography/John-B-Goodenough>)
- Gregersen. E. (2019). M. Stanley Whittingham. Enero 13, 2020, de Encyclopædia Britannica, inc. (url: <https://www.britannica.com/biography/M-Stanley-Whittingham>)
- Gregersen. E. (2019). Yoshino Akira. Enero 13, 2020, de Encyclopædia Britannica, inc. (url: <https://www.britannica.com/biography/Yoshino-Akira>)
- Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., & Goodenough, J. B. (1980). Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, 15(6), 783-789. (url: [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90012-4))
- Nájar, A. (2009). México: hallan enorme yacimiento de litio. 2009, de BBC mundo, México. (url: https://www.bbc.com/mundo/economia/2009/10/091008_0024_mexico_litio_gm)
- Scrosati, B. (2011). History of lithium batteries. *Journal of solid state electrochemistry*, 15(7-8), 1623-1630. (url: <https://doi.org/10.1007/s10008-011-1386-8>)
- Smil, V. (2004). World History and Energy. *Encyclopedia of Energy*, Volume 6, Elsevier Inc. (url: <http://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-2004world-history-energy.pdf>)
- Whittingham, M. S. (1974). The hydrated intercalation complexes of the layered disulfides. *Materials Research Bulletin*, 9(12), 1681-1689. (url: [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(74\)90162-7](https://doi.org/10.1016/0025-5408(74)90162-7))

- Whittingham, M. S. (1976). Electrical energy storage and intercalation chemistry. *Science*, 192(4244), 1126-1127. (url: <https://doi.org/10.1126/science.192.4244.1126>)
- Yoshino, A., Sanechika, K., & Nakajima, T. (1987). U.S. Patent No. 4,668,595. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.