

Desde la Electrónica hacia la *electrificación del transporte público*

En esta revisión presentamos un relato muy breve de los primeros momentos en que se descubrieron los electrones, seguido de la invención de los primeros dispositivos destinados a controlar su transporte para que pudieran usarse no solo en aplicaciones como portadores de energía sino también como señales de control, comunicaciones, sensores, informática y últimamente en la fabricación de nanomateriales. El rápido desarrollo de estos dispositivos llega a tal punto que, gracias al silicio, las técnicas

Jorge M. Seminario
Texas A&M University
06 de agosto de 2024

de fotolitografía y similares, así como a la nanotecnología y la ciencia de datos, somos capaces de diseñar y seguir diseñando dispositivos y materiales cada vez más pequeños. Nuestro foco está en las baterías modernas, que nos permitirán hacer portátiles no sólo esos nuevos pequeños dispositivos electrónicos, sino también el desarrollo de baterías para sistemas de alta potencia, y así ayudarnos a tener un mejor medio ambiente y condiciones de vida para todos. Esta revisión finaliza explicando algunas de las cuestiones importantes y desafiantes en el diseño de nuevas baterías para el transporte público.

https://doc.uni75paima.org/02_La_electrificacion_transporte_publico.pdf

Desde la Electrónica hacia la electrificación del transporte público

Jorge M. Seminario
Chemical Engineering; Electrical and Computer Engineering; Materials Science and
Engineering
Texas A&M University
College Station, Texas, USA

Citar: J. PAIME, 2024, 1, 1-11
06 de agosto de 2024

Resumen

En esta revisión presentamos un relato muy breve de los primeros momentos en que se descubrieron los electrones, seguido de la invención de los primeros dispositivos destinados a controlar su transporte para que pudieran usarse no solo en aplicaciones como portadores de energía sino también como señales de control, comunicaciones, sensores, informática y últimamente en la fabricación de nanomateriales. El rápido desarrollo de estos dispositivos llega a tal punto que, gracias al silicio, las técnicas de fotolitografía y similares, así como a la nanotecnología y la ciencia de datos, somos capaces de diseñar y seguir diseñando dispositivos y materiales cada vez más pequeños. Nuestro foco está en las baterías modernas, que nos permitirán hacer portátiles no sólo esos nuevos pequeños dispositivos electrónicos, sino también el desarrollo de baterías para sistemas de alta potencia, y así ayudarnos a tener un mejor medio ambiente y condiciones de vida para todos. Esta revisión finaliza explicando algunas de las cuestiones importantes y desafiantes en el diseño de nuevas baterías para el transporte público.

La ruta hacia la miniaturización de dispositivos electrónicos

Es interesante saber que el efecto semiconductor fue reportado en 1833 por Faraday, y la conducción eléctrica asimétrica por Braun en 1874; todo esto ocurrió aun antes del descubrimiento del electrón en 1897 por J. J. Thomson. Luego vino el invento inmediato del tubo de vacío por J. A. Fleming in 1904, así como el del diodo semiconductor también en 1904. Estos dieron inicio al área de la electrónica y con la subsecuente invención del triodo por L. De Forest in 1906, tetrodo (Schottky 1919) y pentodo por Holst y Tellegen (1926), dieron inicio a la ingeniería electrónica. Debido al gran tamaño, peso y demanda energética de estos dispositivos, los artefactos electrónicos eran prácticamente inmóviles. No fue hasta 1947 con la invención del transistor y la introducción del transistor de silicio (1954), el inicio de una electrónica más liviana y algo portable.

Gracias a la posterior creación y desarrollo de la fotolitografía (Andrews y Bond, 1955) para fabricar circuitos impresos en 1957, y luego la invención de la fotolitografía (Lathrop y Nall, 1958), para fabricar los primeros circuitos integrados, dan inicio a la microelectrónica que por el año de 1971 era capaz de fabricar alrededor de 200 transistores por mm^2 , algo extraordinario para esos tiempos. Visto en retrospectiva y desde la microelectrónica, se ven los transistores aún muy grandes, ya que se había tallado un transistor por cada $5,000 \mu\text{m}^2$ de área de silicio. El año de 1971 (anunciado en 1970) sale al mercado el primer microprocesador programable, el Intel 4004 de solamente cuatro bits, cuando muchos de nosotros empezaban su carrera en ingeniería y para el año de 1974 el primer microprocesador de 8-bits (Intel 8080) es introducido, con el cual se inicia más tarde la era de las computadoras personales cuando el Intel 8088 aparece en una PC de la IBM en 1982.

Con el éxito rotundo en la reducción del tamaño de los transistores y el efecto tecnológico producido con la introducción de la iniciativa de la nanotecnología el año 2000 en muchas partes del mundo, se ha llegado, en el año 2024 a sobrepasar los 100 millones de transistores por mm^2 , esto es 100 transistores por μm^2 , así cada transistor ya está en dimensiones de nanómetros (nm). Tenemos, por ejemplo, procesadores (CPUs), aun llamados microprocesadores, que contienen cien mil millones (10^{11}) de transistores. Esto ha dado origen a términos como nanoelectrónica y también la moletrónica que utiliza moléculas para diseñar dispositivos electrónicos. Prácticamente, cualquiera de los componentes de un teléfono móvil en el 2024 es un producto de la nanotecnología y nanoelectrónica en particular. Tal desarrollo de la electrónica ha causado un tremendo impacto en todas las áreas de nuestras vidas individuales y como sociedad. Recientemente tenemos, en progreso aun, los tremendos avances en “Data Science” capaz de manejar cantidades increíbles de datos usando técnicas de “Machine Learning” (ML) y “Artificial Intelligence” (AI).

Energización de dispositivos electrónicos

Las eras del silicón, circuitos integrados, nanotecnología, entre otras, invitan a diseñar dispositivos y equipos portables; el reducido peso permite su uso individual y con ello trae consigo la necesidad de energizar (alimentar) esos dispositivos electrónicos con fuentes de alimentación pequeñas en tamaño lo cual implica una alta densidad gravimétrica de energía (GED). Siendo que la energía necesaria se requiere que esté en forma eléctrica, uno podría decir que el uso de capacitores sería una alternativa. Un capacitor almacena energía eléctrica y puede devolverla cuando se requiere. El problema es que ellos no almacenan una GED apropiada para ser utilizados aun en las aplicaciones más pequeñas. Por otro lado, almacenar la energía en forma mecánica, térmica y magnética o aun electromagnética (ej., óptica) no son prácticas y tampoco producen un GED apropiado, aun siendo muy pequeños. La nuclear es una alternativa, pero no es práctica para los usos que se desean. Así, prácticamente nos quedamos con

almacenar la energía en forma química, esto es almacenándola en los enlaces entre átomos.

Así los dispositivos electroquímicos para esto son sin dudas las baterías electroquímicas. Baterías recargables como las de hidruro metálico de cadmio, también conocidas como baterías de níquel-cadmio (NiCd) fueron usadas en las primeras laptops, camcorders y dispositivos manuales. Su GED llega más o menos a 50 Wh/kg (50 vatios-hora por kilogramo) un valor muy pequeño que cuando se usaba con un dispositivo portátil o laptop el peso total era algo impráctico. Similarmente lo fueron las baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH), que llegan a alrededor de 70-100 Wh/kg. Un hito en el desarrollo de las baterías se produce en 1991 cuando se investiga y desarrolla las ahora usadas baterías de iones de litio (LIB). Después de un masivo despliegue de investigación multidisciplinaria, en equipos de muchas universidades, laboratorios nacionales e industriales, estas baterías llegan a tener un máximo de 270 Wh/kg lo cual las hace muy apropiadas para las modernas laptops, teléfonos móviles y una serie de otros dispositivos, así como también, eliminando el efecto memoria, el impacto ambiental, y el costo, así como incrementando su performance. Incidentalmente, el premio nobel de química fue otorgado a Goodenough, Whittingham y Yoshino en el 2019 por sus contribuciones en el desarrollo de la LIB usando electrodos de intercalación, lo que represento un gran avance sobre las baterías tradicionales.

Baterías para el transporte publico

El tremendo salto de a 270 Wh/kg logrado con las LIB enseguida trajo la idea de reemplazar los automóviles con motores de combustión interna (ICE) por automóviles totalmente eléctricos alimentadas eléctricamente por baterías en vez de un tanque de gasolina que normalmente se usan en los automóviles con ICE. Mas aun, por razones medioambientales y económicas, es muy importante desarrollar baterías eficientes, robustas, ligeras y seguras para el transporte vehicular.

Los primeros automóviles eléctricos y aun muchos actualmente con LIB tienen pesos de sus baterías que van desde los 500 kg hasta 1,500 kg con una batería con GED de 210 Wh/kg. Este altísimo peso representa entre el 30 a 25% del peso total del vehículo sin ocupantes ni equipaje (curb weight). Esto hace impráctico, por ejemplo, tener una batería de repuesto y que entre 25-30% de la energía de la batería se gaste en transportar la batería misma. Comparado con el peso de la gasolina a tanque lleno no es más de 40 kg y el tanque vacío pesa 50 kg. Todo esto, nunca detuvo la introducción y desarrollo de automóviles eléctricos, más bien incremento los esfuerzos de investigación fundamental y aplicada para el desarrollo de nuevas tecnologías de baterías.

La Electroquímica de Baterías

Les presentare una rápida introducción a las baterías recargables, con énfasis a las de litio. Las baterías recargables, como las de litio, constan básicamente de tres partes esenciales: los electrodos ánodo y cátodo y, el electrolito. El objetivo es introducir energía eléctrica a la batería a través de una corriente continua de electrones movidos a través de una fuente alimentación de un determinado voltaje (generalmente de alrededor de 5 voltios). La corriente eléctrica de entrada será de acuerdo con el tamaño y tipo de batería.

¿Cómo transformar la energía eléctrica en energía química? Dado que la energía química existe en las interacciones eléctricas entre electrones y núcleos, veamos cómo se comporta el átomo de litio cuando está cargado y descargado. Litio (Li) aparece como el tercer elemento en la Tabla Periódica, implicando que tiene tres protones y en estado neutral tres electrones. Hablando en unidades atómicas, la carga elemental se define como, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ Coulomb, así, cada protón tiene una carga $q = +1$ y cada electrón una carga $q = -1$. Los átomos de la primera columna tienden a perder un electrón y se convierte en un catión, o un ion con carga $q = +1$, y en electroquímica se dice que el Li se oxidó a Li^+ ; oxidación es lo que ocurre espontáneamente en un metal que está expuesto al ambiente. Los restantes dos electrones de litio están bastante atraídos al núcleo (electrones 1s) que su eyección no ocurre fácilmente como la del tercer electrón (electrón 2s). Esto es normalmente un proceso espontaneo, esto es, exotérmico, la oxidación emite energía. El proceso inverso, cuando el Li-ion (Li^+) absorbe un electrón para convertirse en neutral Li, se conoce como una reducción y es necesario entregar energía (proceso endotérmico) y no ocurre espontáneamente. Siendo el Li fácilmente oxidado, esto explica porque se encuentra el Li bastante oxidado, dificultando conseguir la pureza necesaria para su uso en baterías.

Para aprovechar esta propiedad de oxidación-reducción del litio, se requiere un electrodo donde el Li se oxide fácilmente y que esa energía que emita y se la lleve un electrón hacia el dispositivo que se quiere alimentar (por ejemplo, al motor eléctrico de un automóvil), además cuando se oxida el Li, debe estar en un ambiente (electrodo) donde su energía de interacción con el electrodo es alta; y por otro lado este Li-ion debe viajar internamente en la batería hacia otro electrodo donde la energía de interacción sea baja. En resumen, el Li-ion caerá de su alto potencial en el ánodo espontáneamente a un potencial más bajo hacia el cátodo donde su energía de interacción es baja, pero el electrón saldrá eyectado por el ánodo con la energía que hay entre el ánodo y el cátodo por el exterior de la batería. El camino interno del ion es a través del electrolito, el cual debe tener buena conductancia (baja resistencia) para el ion, pero debe evitar que los electrones pasen (alta resistencia), de lo contrario se produciría un corto circuito con terribles consecuencias. De ahí, que se requiera un circuito electroquímico, ya que para almacenar la energía en forma química tiene que moverse átomos en forma de iones.

Lo explicado en el párrafo anterior se refiere al ciclo de descarga de la batería. Una vez que todos los litios en el ánodo se oxidaron a Li^+ y viajaron o cayeron (en energía) al cátodo, donde se redujeron a Li neutral (o simplemente Li), implica que la batería esta

descargada y ahora necesita cargarse. Lo de cayeron los iones es haciendo una analogía a la energía potencial producida por gravedad a dos alturas diferentes, donde el cuerpo que está más arriba puede caer espontáneamente a una altura más abajo, pero no lo contrario.

Para la carga de la batería el proceso es inverso, se tiene que energizar el cátodo para que los Li en él se oxiden y suban al ánodo, o sea hay que entregarles la energía que proveyeron durante la descarga más un pequeño overhead debido a resistencias internas de la batería. Una vez que los iones (Li^+) llegan al ánodo, estos se reducen a Li y se quedan almacenados, una vez que termina la carga, normalmente cuando ya no se puede almacenar más iones en el ánodo o cuando ya no hay más en el cátodo, la batería queda lista a ser usada (descarga).

Un poquito más sobre la nomenclatura. En el ánodo, el Li^+ tiene más energía que la que tiene en el cátodo, esto es, $E_a > E_c$. Pero cuando observamos una batería comercial vemos que el potencial es positivo en el cátodo y el ánodo es el negativo, esto es, $V_c > V_a$. Por un lado, como las dos cantidades son relativas, los símbolos de + y - solo indican cual es el mayor y menor, respectivamente. Pero el intercambio de signos entre E y V es porque la energía potencial (E) no es lo mismo que el potencial eléctrico (V) o también conocido como, diferencia de potencial voltaje, tensión, fuerza electromotriz, etc., pero están relacionados por $E = qV$ o más precisamente por $V = dE/dq$. Siendo la carga del electrón negativa, tenemos que el potencial eléctrico en el cátodo es mayor que el potencial eléctrico en el ánodo. Normalmente se acostumbra por comodidad hacer cero el potencial eléctrico en el ánodo, así cuando hablamos de una batería de 1.5 voltios (V), estamos refiriéndonos a una diferencia de potencial de 1.5 V con el ánodo a potencial cero.

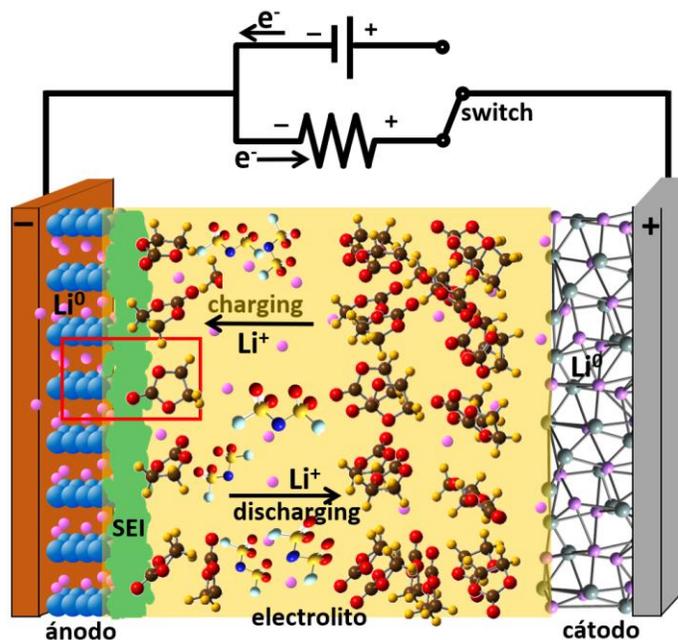


Figura 1. Esquema atomístico del funcionamiento de una típica LIB (batería de iones de litio). Los litios (rosado) en los electrodos se encuentran neutralizados y allí pueden permanecer quietos mientras la batería esta desconectada, i.e., a circuito abierto (OC), con el switch intermedio entre la fuente y la resistencia. El electrolito se encuentra en la zona amarilla. Cuando la batería está en el ciclo de carga, el switch en la parte superior está conectado al terminal positivo de la fuente de alimentación que carga a la batería. Así, apenas se conecta el cargador, los electrones salen del cátodo hacia el terminal positivo de la fuente, oxidando a los Li del cátodo a Li-iones, quienes “suben” al ánodo a través del electrolito, mientras que los electrones impulsados por la fuente de alimentación van hacia el ánodo a neutralizarlos (reducirlos). Durante el ciclo de descarga, apenas se conecta la resistencia (representando a un motor, teléfono, etc.), electrones salen del ánodo oxidando a los litios neutrales a Li-iones (Li^+) que “caen” espontáneamente al cátodo a través del electrolito, recibiendo a los electrones que salieron del ánodo, i.e., neutralizándose (reduciéndose). El electrolito (amarillo) puede ser liquido como puede ser sólido, pero debe tener alta conductancia para los iones y debe evitar que los electrones se escapen al electrolito (de alta resistencia). Los dos electrodos deben ser buenos conductores tanto de iones como electrones y así facilitar las reacciones de oxidación y reducción. La zona verde entre el ánodo y electrolito se forma durante los primeros ciclos de carga-descarga de la batería, la predicción de su constitución y mecanismo de formación es aún un reto fundamental y tecnológico, es conocida como la “solid-electrolyte interphase (SEI)” cuando se forma correctamente, es una película delgada que evita el efecto túnel de los electrones del energético ánodo a que se escapen hacia el electrolito, destruzándolo eventualmente. Finalmente, la placa (cobrizo) antes del ánodo y la placa (gris) después del cátodo son placas metálicas muy delgadas buenos conductores de electrones. Son conocidas como los colectores de electrones y constituyen la interface al circuito externo, por ellos salen y entran los electrones durante las cargas y descargas. Normalmente se usa cobre para el ánodo y aluminio para el cátodo.

Como se indica en la Figura 1, entre el ánodo y el electrolito se forma una capa de pasivación conocida como la interfase solido-electrolito (SEI) que es una pequeña película de pasivación formada mayormente después de los primeros ciclos de funcionamiento de la batería. Esta pequeña película reduce el efecto túnel de los electrones en el ánodo escapándose hacia al electrolito a pesar de la alta impedancia al paso de electrones. El efecto túnel es inevitable ya que siempre habrá una probabilidad de escape de electrones. Es todo un arte y ciencia determinar el electrolito óptimo para cada par de electrodos.

Con las baterías modernas de LIB ya se está llegando a los límites teóricos de carga de los materiales que se emplean. Normalmente el material de preferencia para el ánodo es el grafito, el cual consta de planos de paralelos de átomos de carbón mostrados en la Figura 2. Como puede verse en la Figura, se requieren seis átomos de carbón para almacenar un átomo de litio. Siendo el peso atómico de litio 7 y el de carbón 12, por lo tanto, se requiere un peso de $6 \times 12 = 72$ gramos de carbón para almacenar 7 g de litio que es el “combustible” para un carro eléctrico. Aquí se ve el problema del alto peso de las baterías y esto es lo mejor que se puede lograr en el ánodo donde se guardan los litios aun no usados.

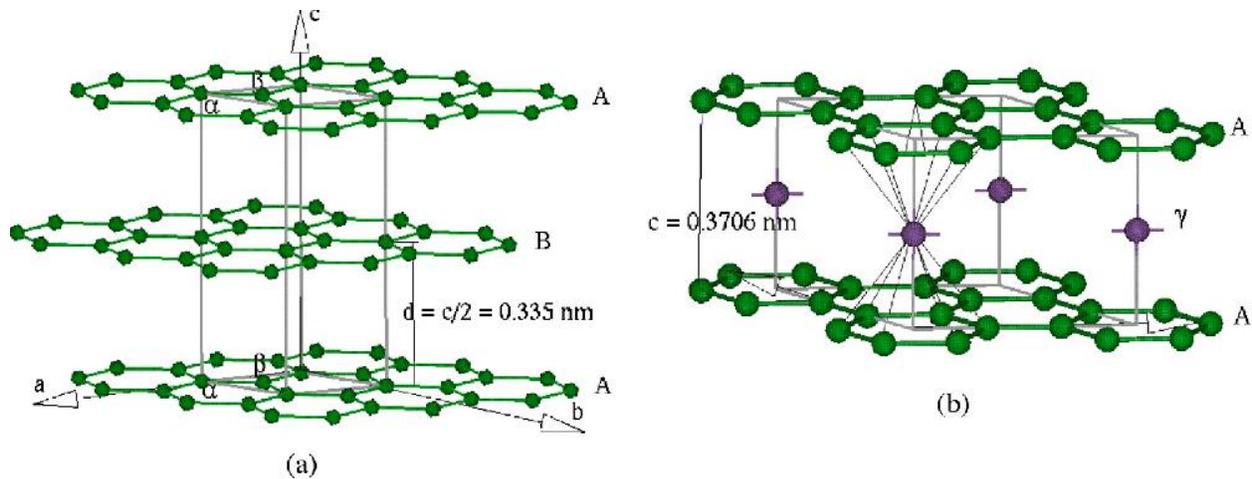


Figure 2 (a) Esquema de la estructura hexagonal cristalina del grafito mostrando la secuencia de apilamiento de las capas AB y la celda unitaria. (b) Estructura del compuesto de grafito intercalado LiC_6 con la secuencia de apilamiento de AgA, siendo g la capa ficticia de iones de litio a mitad de camino de los planos de grafenos. (de Structural and electronic properties of lithium intercalated graphite by K. R. Kganyago and P. E. Ngoepe, 2003v {Kganyago, 2003 #3078}

Un problema similar ocurre en el cátodo, que también se usa un electrodo de intercalación, pero algo más complejo que el del ánodo, ya que los iones deben ser mucho más estables que en el ánodo. Uno de los más preferidos era el LiCoO_2 (óxido de litio y cobalto (LCO)). Pero por razones geopolíticas se tuvo que sustituir la mayor parte del cobalto por otros metales como el níquel y manganeso, que además proveen algunas mejoras. Así se crearon los cátodos tipo NMC 622 donde el 60% del Co fue sustituido por Ni y 20% por Mn, quedando solamente 20% de Co. Otro bien usado es el NMC 811 donde solo 10% es Co.

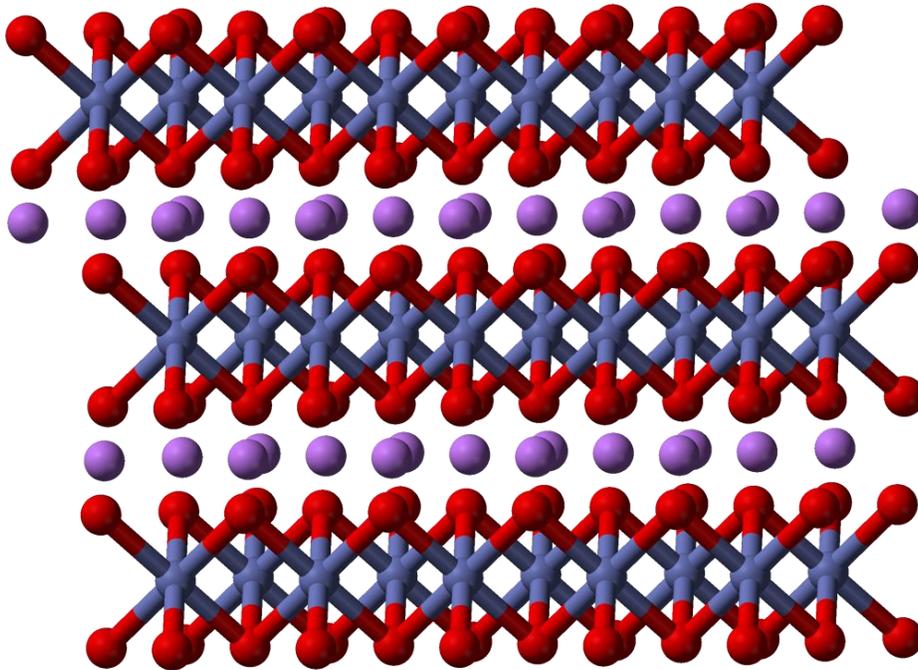


Figura 3. **Cátodos de óxido de litio y cobalto.** Iones de Li (púrpura) están intercalados entre planos de iones de oxígenos (rojo) que a su vez están sostenidos por átomos de cobalto (azul). Structural data from Yang Shao-Horn, Laurence Croguennec, Claude Delmas, E. Chris Nelson and Michael A. O'Keefe (July 2003). "Atomic resolution of lithium ions in LiCoO_2 ". *Nature Materials* 2 (7): 464 - 467. [DOI:10.1038/nmat922](https://doi.org/10.1038/nmat922). Image generated in [Accelrys DS Visualizer](#)

Pero aun el problema del peso de la batería persiste y se incrementa con el cátodo. El peso atómico de un mol de Co es 59 g, el peso del O es 16 g. Esto requiere de 91 g de peso para almacenar solo 7 g de Li. Considerando que el ánodo requiere de 72 g, tenemos un total de 163 g del peso del almacenamiento para cada 7 g del "combustible" litio. Y esto es lo mejor que se puede obtener. Necesitamos guardar el litio en compartimentos que pesan 23 veces más que el litio. El uso de los otros metales como Ni (58.7 g) y Mn (55 g) hacen solo una pequeña modificación. Por ejemplo, con el NMC 811 se requiere 90.3 g para almacenar 7 g de Li en el cátodo, dando un total redondeado de 23 veces más, tal como se obtuvo con el LCO. Y esto es lo mejor que se puede obtener ya que es necesario agregar el peso del electrolito, además de otros componentes estructurales como los 2 colectores de corriente. En estos momentos, la nuevas LIB ya están acercándose a estos límites teóricos fácilmente obtenidos con una Tabla periódica. Entonces la pregunta es ¿qué se hace? Veamos primero cual es el ímpetu para investigar lo desconocido ya que es necesario inventar nuevos tipos de baterías.

¿Porqué y Cómo Desarrollar Nuevas Baterías?

Como mencionamos anteriormente las LIB ya están llegando a su límite de GED. Mejoras sustanciales de este tipo de baterías no se esperan debido a su química misma. Sin embargo, es necesario desarrollar mejores baterías para remplazar los automóviles que usan ICE, debido a su fuerte efecto al medioambiente y otros problemas asociados. Existen muchas alternativas que se están investigando, pero la mayoría está centrada en las de Li-S caracterizada por su ánodo de litio-metal y su cátodo de azufre. El razonamiento va de esta manera. El ánodo: Si eliminamos el grafito del ánodo y solo dejamos que el litio se deposite, moje o bañe (plating) al colector de cobre durante la carga y que se remueva, despoje, deschape (stripping) durante la descarga. Así dejamos al ánodo de intercalación y usamos uno de “stripping-plating”. La gran ventaja es que ahora necesitamos solamente el mismo peso del litio para almacenarlo aumentando de esta manera en 10 veces la capacidad del ánodo. Esto es algo que justifica al menos, investigarse. El cátodo: Se sabe una buena posibilidad de aumentar la capacidad gravimétrica de la batería es usar electrodos de conversión. Esto significa que el cátodo en este caso se va a transformar entre dos materiales diferentes durante la carga y descarga. Hasta ahora, el mejor candidato es el azufre, preferido por su bajo costo, no toxicidad, y de poco impacto ambiental. A pesar de que bastante se ha logrado, aún hay un tremendo gap entre las demostraciones de laboratorio y las aplicaciones prácticas. El cátodo de sulfuro presenta un problema latente que es que consta de anillos de 8 miembros S_8 , el cual es roto por los litios formando polysulfuros de litio (LiPS) secuencialmente hasta llegar a formar el Li_2S para obtener la máxima capacidad de almacenar Li., el problema que los más largos normalmente son solubles en el electrolito y son capaces de abandonar el cátodo y viajar a través el electrolito y aun llegando al ánodo (efecto shuttle), y dañando de esta manera la química del SEI. Figura 4 muestra algunos detalles.

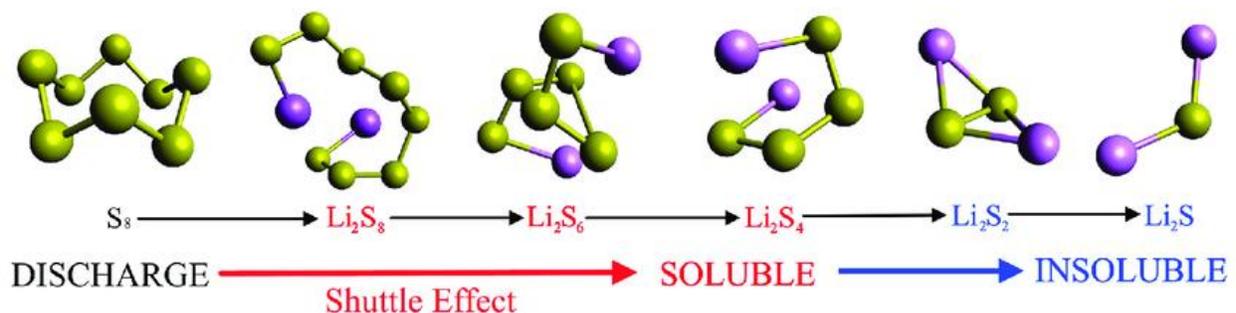


Figura 4. Muestra esquemática del proceso de conversión del azufre S_8 a la llegada de Li-ions, se muestran las cadenas largas Li_2S_8 , Li_2S_6 y Li_2S_4 que son solubles en el electrolito y podrían escapar del cátodo produciendo el efecto shuttle. Las cadenas cortas Li_2S_2 y Li_2S son insolubles y son las que se requieren para lograr un máximo de almacenamiento. from Kim, A.; Dash, J.K.; Patel, R. Recent Development in Novel Lithium-Sulfur Nanofiber Separators: A Review of the Latest Fabrication and Performance Optimizations. Membranes 2023, 13, 183. <https://doi.org/10.3390/membranes13020183> Academic Editors: Chien Wei Ooi and Yu-Kaung Chang.

Así, el par Li-S ofrece la más alta GED que podrían ofrecer un par de elementos sólidos. Esto es de hasta 2,600 Wh/kg, el cual cerca de diez veces más de lo que se obtiene con las mejores baterías recientes de LIB. Sin embargo, hay muchos detalles que aún deben resolverse tanto teóricamente como experimentalmente y están mostrados en la Figura 5. Como los electrodos ya fueron seleccionados, prácticamente por consenso, ahora la investigación se centra en encontrar el electrolito compatible con los dos electrodos Li-S.

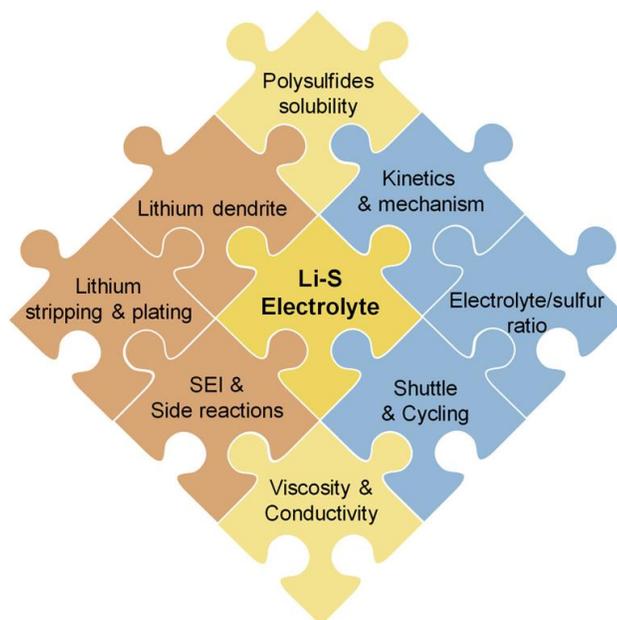


Figure 5. Rompecabezas que muestra las estrechas conexiones entre el electrolito y los dos electrodos. from Yatao Liu, Yuval Elias, Jiashen Meng, Doron Aurbach, Ruqiang Zou, Dingguo Xia, Quanquan Pang; Electrolyte solutions design for lithium-sulfur batteries; Joule; 5, 9, 2021, 2323-2364; <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.06.009>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243512100297X>)

Conclusiones

Esta revisión del estado, progreso, y justificación de la investigación de nuevas baterías pues se justifica en el bien que le hacemos al planeta y a la sociedad.

Una comparación rápida que con una batería de GED de 185 Wh/kg, 540 kg de peso, libera 100 kWh de energía puede mover un automóvil eléctrico por 500 km calculándose una performance de **200 Wh/km**.

La gasolina de un automóvil (ICE) similar en tamaño al eléctrico, libera 13,200 Wh/kg (más de 70 veces lo de la batería), el tanque solo pesa 70 kg y la energía total es de 854 kWh para llevar el automóvil también 500 km. Esto da una performance de **1,708 Wh/km**.

A pesar de todo, el automóvil (ICE) requiere más de 8 veces la energía de lo que requiere el eléctrico para el mismo recorrido. **Están invitados a participar en esta investigación.**