

# El viaje hacia el uso de ENERGÍAS LIMPIAS

*Cada vez como sociedad estamos más conscientes sobre el cuidado del medio ambiente. Existe evidencia de que el calentamiento global está ocurriendo y que hay una correlación entre el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero y las temperaturas que están impulsando el cambio climático. Esta mayor conciencia se asocia, desafortunadamente, a que cada vez los efectos de nuestro descuido frente al cuidado del medio ambiente se hacen más visibles y ya no son parte de un futuro cercano, sino que son parte de nuestro presente ¿Qué hacemos entonces? Debemos ir dejando atrás el uso de combustibles fósiles y construir un futuro en el que la energía provenga solo de fuentes renovables y limpias, pero para que esto ocurra es primordial impulsar el avance y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía, como son las baterías.*

• **Paulina Márquez**  
Dr. en Química, Académica.



Muchas veces se confunde el término calentamiento global con cambio climático y ambos conceptos son tratados como sinónimos, pero si bien están relacionados, no son lo mismo. Cuando hablamos del calentamiento global estamos refiriéndonos al calentamiento a largo plazo del sistema climático de la Tierra desde el período pre-industrial (entre 1850 y 1900) hasta la fecha, producto de actividades humanas, principalmente asociadas al uso de combustibles fósiles, que provocan un aumento en los niveles de gases de efecto invernadero. Por otro lado, el término “cambio climático”, se refiere al calentamiento producido tanto por el hombre como por la naturaleza y los efectos que tiene en nuestro planeta. Se mide comúnmente como el aumento promedio en la temperatura de la superficie global de la Tierra. Desde el período pre-industrial, las actividades humanas han aumentado la temperatura promedio global de la Tierra en aproximadamente 1°C, un número que actualmente aumenta en ~0,2 °C por cada 10 años, como se muestra en la gráfica de la Figura 1 a), donde se representa el cambio de la temperatura global superficial de la Tierra entre los años 1880 y 2020. Este hecho concuerda con la segunda ley de la Termodinámica, la cual indica que no existen los móviles perpetuos, es decir si utilizo energía para hacer funcionar algún motor, el motor no podrá ocupar toda la energía de la fuente para realizar un determinado trabajo y siempre habrá parte de la energía que será emitida al entorno en forma de calor (calentando el entorno).

Sin el efecto invernadero natural, el calor de la Tierra sería emitido desde la superficie hacia el espacio y nuestro planeta tendría una temperatura promedio de unos -20 °C. Entonces, surge la siguiente duda; ¿por qué el efecto invernadero es considerado un fenómeno negativo para nuestro planeta? La problemática con estos gases se genera cuando sus concentraciones se modifican drásticamente, como ocurre, por ejemplo, con el CO2 generado por procesos industriales y transporte, estos gases provocan la formación de una especie de manta aislante alrededor de la Tierra, lo que trae como consecuencia que se capte más calor del Sol en la atmósfera. Uno de los factores a los que se le atribuye el aumento de todos estos gases se relaciona principalmente al incremento de la población, lo que ha llevado a una mayor demanda de productos de diversas áreas como por ejemplo; energía, transporte, construcción, agricultura y ganadería, entre otros. En este artículo nos centraremos en aspectos relacionados con la problemática asociada a la energía. Actualmente, el consumo de energía se satisface principalmente a través del uso de combustibles fósiles, este es un gran problema ya que no podemos depender de un combustible cuyo agotamiento se prevé en un futuro cercano y por otro lado, su uso contribuye al incremento de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, para enfrentar esta problemática global debemos, lo antes posible, lograr reducir drásticamente su producción y consumo, para de esta forma, ir frenando la contaminación asociada a su uso. Unas de las soluciones que se plantea consiste en potenciar el uso de energías renovables y limpias, acopladas a tecnologías de almacenamiento de bajo

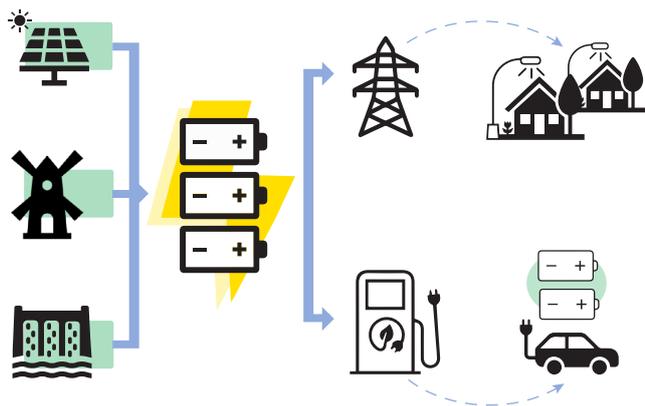


**Figura 1**

a) Gráfico que muestra el cambio en la temperatura global de la superficie en relación con las temperaturas promedio de 1951-1980, con el año 2020 [1] b) Esquema de efecto invernadero.

Para comprender mejor el calentamiento global es importante entender en qué consiste el efecto invernadero (Figura 1 b)). Este es un proceso donde parte de la radiación infrarroja del Sol pasa a través de la atmósfera y luego, la mayor parte de esta radiación es absorbida y reemitida en todas direcciones por las moléculas de gases de efecto invernadero. Este efecto provoca un calentamiento de la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior. Dentro de los gases de efecto invernadero se encuentra el dióxido de carbono (CO2), metano (CH4) Óxidos nitrosos (NOx), vapor de agua (H2O) y gases fluorados. Dentro de los gases recién mencionados, todos, excepto los gases fluorados, pueden ser generados de forma natural. Estos gases, generados de forma natural, son muy importantes ya que permiten mantener nuestro planeta a una temperatura adecuada para la

consumo y sostenibles y, por otro lado, a través del desarrollo y avance de la electromovilidad, como se representa en el esquema de la Figura 2.



**Figura 2**

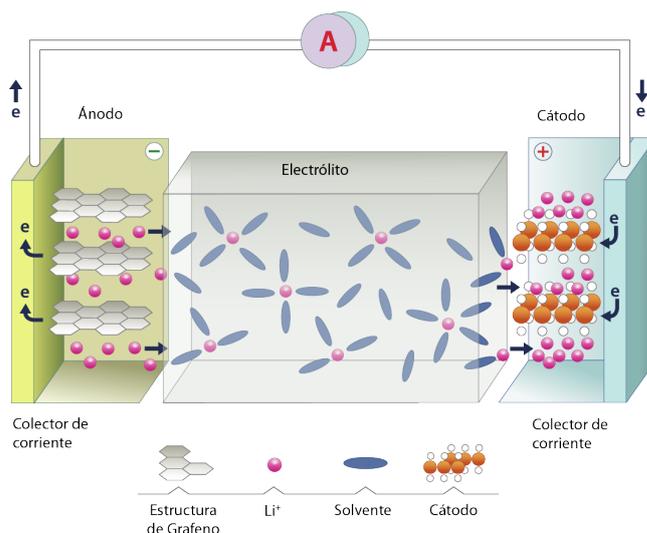
Esquema representativo donde se muestra la relación entre energías renovables y sistemas de almacenamiento de energía del tipo estacionario para abastecer redes para uso domiciliario y/o industrial así como también para el abastecimiento de energía para vehículos eléctricos.

Las fuentes de energía renovables son aquellas cuya disponibilidad en la naturaleza y su capacidad de regeneración es continua, por lo que se genera en cantidades inagotables. Por otro lado, las energías limpias son aquellas que no liberan gases de efecto invernadero durante su proceso de generación. Dentro de este tipo de energías destaca la energía eólica, la energía solar y la energía hidráulica. En este contexto, nuestro país tiene un gran liderazgo en materia de energías renovables dentro de América Latina. En Chile contamos con la radiación solar más alta del mundo y además con fuertes vientos de norte a sur para desarrollar energía solar y energía eólica, respectivamente. Estas condiciones han permitido que la capacidad instalada de generación de energía renovable en Chile creciera del 2% del total nacional en 2005 al 26,4% en 2020. Este crecimiento se encuentra liderado principalmente por proyectos solares y eólicos [2]. Pero para poder sacar el máximo de provecho a este tipo de energía se debe contar con sistemas de almacenamiento, esto es requerido debido a que la energía obtenida a partir de fuentes renovables presentan intermitencia, ya que son dependientes de factores climáticos, por lo que se requiere de sistemas de almacenamiento eficientes, económicos y amigables con el medio ambiente para que la energía sea almacenada y luego liberada a la red de forma continua. Dentro de los sistemas de almacenamiento de energía se encuentran las baterías. Actualmente, una de las baterías más comúnmente utilizada para almacenar energía a partir de fuentes renovables son las baterías de plomo-ácido regulada por válvulas. Esto se asocia a que estos dispositivos tienen un extremo bajo costo inicial. Las baterías de ion-litio se espera también puedan ser utilizadas de forma masiva en estos sistemas, pero para que esto ocurra, aún se debe avanzar en la reducción de costos asociados a esta tecnología. Actualmente, las baterías de ion-litio son ampliamente utilizadas debido a su excelente rendimiento y densidad de energía. Se utilizan principalmente en dispositivos portátiles, como computadores y teléfonos móviles. Además, estas baterías también están siendo utilizadas en aplicaciones de mayor demanda, como son los vehículos eléctricos o vehículos eléctricos híbridos. En cuanto al desarrollo de estos vehículos eléctricos, su costo depende principalmente del sistema de batería que se utilice (alrededor del 40 % del costo total), por lo que el avance tecnológico de estos dispositivos, junto con el reciclaje de sus componentes, es fundamental para que en un futuro estos vehículos reduzcan sus costos de fabricación y puedan ser utilizados ampliamente por la población y logren, de esta forma, desplazar a los actuales vehículos que funcionan con combustibles de derivados del petróleo [3].

Pero, ¿Cómo funcionan estos dispositivos? Las baterías ion litio están formadas por un cátodo cuyo componente principal es un óxido de metal de transición (Por ejemplo;  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  o  $\text{Li}(\text{Ni},\text{Mn},\text{Co})\text{O}_2$ ), un ánodo de grafito, un separador y un electrolito orgánico, como se muestra en el esquema de la Figura 3. Los cátodos y ánodos son los transportadores de carga que contribuyen al almacenamiento y liberación de energía. El separador divide físicamente los electrodos para evitar cortocircuitos internos y además permite un flujo interno de iones  $\text{Li}^+$ . La base del funcionamiento de estos dispositivos se relaciona a la inserción y desinserción de iones  $\text{Li}^+$  entre los electrodos.

Las baterías de ion litio pasaron por diversas etapas antes de que logran ser utilizadas de forma comercial. Todo comenzó a principios de la década de 1970, cuando el químico Stanley Whittingham desarrolló la primera batería funcional recargable utilizando un ánodo de litio metálico y un cátodo de disulfuro de titanio. Luego, en 1980, el físico John Goodenough duplicó el voltaje de la batería, empleando óxido de cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ) como material catódico. Finalmente, notaron que el uso de litio metálico como ánodo generaba problemas de seguridad, por lo que en 1985, el químico Akira Yoshino logró solucionar esta problemática, reemplazando el litio metálico por grafito. Esto lo logró gracias al descubrir que el grafito presentaba una respuesta similar a la del ánodo de litio metálico, pero sin los inconvenientes y riesgos asociados a ese material. Estos avances permitieron desarrollar una batería de ion-litio comercial y recargable de bajo peso, de alto voltaje y alta capacidad de carga. Gracias a los aportes realizados por estos científicos éstos fueron recientemente galardonados por la Real Academia de Ciencias de Suecia con el premio nobel de química [4].

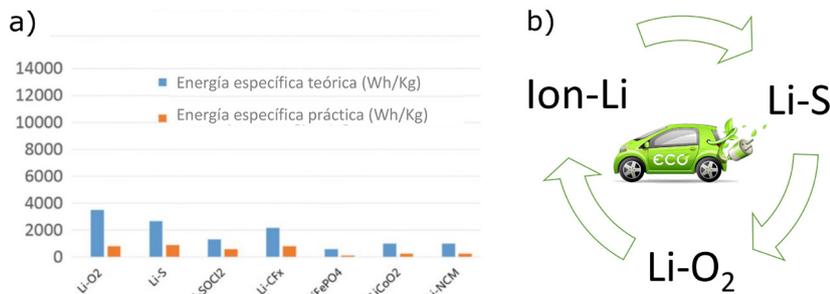
A pesar de los avances tecnológicos asociados a las baterías de ion-litio, estas baterías pronto alcanzarán su máximo potencial, por lo que es poco probable que logren por sí solas cumplir con todos los objetivos de rendimiento, costo y escala necesarios para el almacenamiento de energía, tanto para el transporte electrificado, como para sistemas de almacenamiento estacionario. Es por lo anterior, que es primordial avanzar en nuevas alternativas de almacenamiento. Para lograr este avance, se deben buscar nuevos sistemas de baterías que permitan responder a la demanda energética proyectada. Dentro de esta búsqueda aparecen las



Cuando ocurre el proceso de carga, los iones  $\text{Li}^+$  se separan de los materiales del cátodo ( $\text{LiCoO}_2$ ), difunden en el electrolito y se mueven a través del separador para intercalarse en el material del ánodo (grafito). Mientras tanto, los electrones se mueven en dirección opuesta a través del circuito externo para mantener la electroneutralidad. Durante la descarga, los iones  $\text{Li}^+$  se transportan desde el lado del ánodo hasta el cátodo.

**Figura 3**

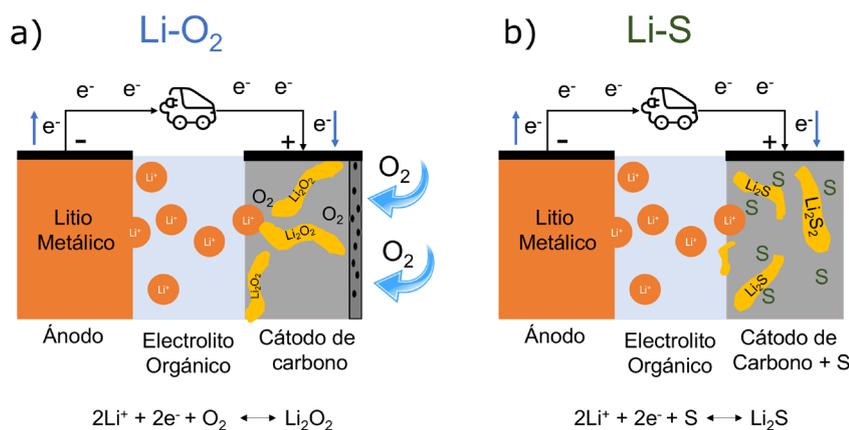
Esquema de funcionamiento de una batería de iones de litio.



**Figura 4**

a) Gráfico en el que se muestran los valores de densidad de energía teórica (barra color azul) y práctica (barra Naranja) de algunos sistemas de baterías recargables [5]. b) Esquema que representa la migración de baterías ion-Li hacia nuevas alternativas como; Li-O<sub>2</sub> y Li-S, las cuales pueden coexistir y ser utilizadas en conjunto para potenciar la electromovilidad.

baterías litio oxígeno (Li-O<sub>2</sub>) y litio azufre (Li-S). Estos tipos de dispositivos, si bien parecen similares a las baterías de ion-litio, operan bajo una química completamente diferente, lo que permite que los valores de densidad de energía teórica sean considerablemente mayores en comparación a la máxima densidad de energía que se proyecta para las baterías de ion-litio (350 Wh/kg). En el caso de Li-O<sub>2</sub> y Li-S, estas podrían alcanzar una densidad de energía teórica de 3,500 Wh/kg y 2597 Wh/kg, respectivamente, como se observa en el gráfico de la Figura 4a). El uso de estos sistemas de almacenamiento están pensados principalmente para aplicaciones de mayor demanda energética como son los vehículos eléctricos. Ambas baterías funcionan con un ánodo de litio metálico y un cátodo de carbono poroso, que, en el caso de las baterías Li-O<sub>2</sub>, utilizan como material activo oxígeno y en el caso de las Li-S utilizan azufre (S). En las baterías de Li-O<sub>2</sub> cuando ocurre el proceso de descarga ocurre la reacción de reducción de oxígeno en el cátodo y la oxidación de litio metálico en el ánodo, llevando a la formación de peróxido de litio (Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), el cual, durante el proceso de carga, es oxidado generando O<sub>2</sub>. Las baterías Li-O<sub>2</sub> son sistemas semiabiertos, ya que el O<sub>2</sub>, que es el material activo, ingresa de forma continua a través del cátodo a través de una membrana permeable y luego, en cada recarga, se elimina por esta misma vía, como se muestra en el esquema de la Figura 5 a). Con respecto a la batería Li-S, utiliza azufre como material activo en el cátodo. Este material presenta gran abundancia, bajo costo y además, es compatible con el medio ambiente. En la Figura 5 b) se muestra el funcionamiento de una batería típica de Li-S, la cual funciona con reacciones electroquímicas reversibles entre el litio metálico y el azufre en un electrolito orgánico. Durante la descarga, el ánodo de litio metálico se oxida a iones litio, que migran al cátodo y en el cátodo de azufre se forman polisulfuros de cadena larga (Li<sub>2</sub>S<sub>x</sub>, donde x = 4 - 8) que se disuelven en el electrolito y luego se precipitan en forma de disulfuros y/o sulfuros de litio insolubles (Li<sub>2</sub>S<sub>2</sub> o Li<sub>2</sub>S). [6]



**Figura 5**

Esquema de funcionamiento de una batería Li-O<sub>2</sub> (a) y Li-S (b) durante el proceso de descarga.

Ambas baterías aún se encuentran en una etapa experimental y para que logren ser utilizadas de forma comercial se deben superar diversos obstáculos que, por un lado, limitan los valores de densidad de energía práctica, reducen su recargabilidad, así como también su vida útil, y por otro lado, se deben solucionar las problemáticas asociadas a seguridad para que puedan ser utilizadas en vehículos eléctricos. La cantidad de ciclos de carga-descarga que estos dispositivos pueden alcanzar se encuentra limitada principalmente a procesos indeseados que van generando productos que pasivan las

superficies catódicas. A pesar de estos inconvenientes, al igual que para el desarrollo de las baterías de ion-litio, se deben identificar los problemas asociados a su funcionamiento y rendimiento para ir tras la búsqueda de posibles soluciones que permitan avanzar o ir modificando la estructura de los dispositivos para que puedan, en un futuro cercano, llegar a ser comercial.

En Chile aún nos queda mucho por hacer en esta materia, tenemos el privilegio de contar con una de las mayores reservas de litio; el Salar de Atacama. Este salar cuenta con el 40 % de las reservas de interés económico a nivel mundial y fue el primer yacimiento explotado en Sudamérica, desde 1984 a la actualidad. A partir de este salar se obtiene principalmente carbonato de litio (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Chile puede contribuir de forma aún más activa en esta temática, no solo aportando con litio como materia prima, sino que también, explorando el desarrollo de nuevas tecnologías, ya sean asociadas a la optimización de procesos de extracción o purificación del carbonato de litio de forma sostenible, así como también, desarrollando nuevos productos de litio, con mayor valor agregado, como por ejemplo; hidróxidos y litio metálico de alta pureza. Asimismo, invertir como país en áreas asociadas a la generación de mayor conocimiento técnico para lograr avanzar en investigación y desarrollo enfocado a la fabricación de nuevos materiales anódicos o catódicos que podrían ser utilizados en baterías, así como también a la investigación de nuevos sistemas como son las baterías Li-O<sub>2</sub> y Li-S. Los diversos sistemas de almacenamiento basados en litio podrían complementarse y generar efectos sinérgicos que permitirían potenciar el uso de energías renovables limpias. Finalmente, todos estos esfuerzos nos permitirán aportar hacia la meta de la descarbonización.

## Referencias

- [1] NASA's Goddard Institute for Space Studies: <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/>
- [2] <https://investchile.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/03ebook-energia-eng-.pdf> REPORT Energy, Projection & Opportunities, Abril 2021.
- [3] Youping Miao, et.al. Journal of Hazardous Materials, Vol.425, 127900 (2022)
- [4] <https://www.kva.se/en/news/nobelpriset-i-kemi-2019-2/>
- [5] Zhang, H. et.al. (2017). Li-S and Li-O<sub>2</sub> Batteries with High Specific Energy. In: Li-S and Li-O<sub>2</sub> Batteries with High Specific Energy. DOI 10.1007/978-981-10-0746-0\_1
- [6] Hong Jie Peng, et al. Chem. Soc. Rev., Vol. 46, p. 5237-5288 (2017)