

¿Litio o Zinc? La batalla por el futuro de las baterías para el transporte eléctrico



Mtro. Jorge Alejandro Arredondo Espínola*
Dr. Walter Noé Velázquez Arjona
Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.
jorge.arredondo@cimav.edu.mx

Resumen

Las baterías de zinc-aire se perfilan como una alternativa prometedora a las baterías de litio que hoy dominan celulares y vehículos eléctricos. Ofrecen alta densidad energética (pueden almacenar mucha energía en poco espacio), buena seguridad, baja toxicidad y menor costo, lo que las hace atractivas para dispositivos móviles y para la electromovilidad, es decir, el uso de vehículos impulsados por electricidad. Sin embargo, al necesitar oxígeno del ambiente para funcionar, surgen dudas sobre su desempeño en lugares con poco oxígeno y en condiciones de frío o calor extremos. En este artículo se compara el potencial de estas baterías de zinc-aire, consideradas una tecnología emergente, con los sistemas de ion-litio ya optimizados, a partir de resultados obtenidos por el grupo de investigación Nanomat-Lab. Además, se analizan retos ambientales, sociales y económicos, como el impacto de la extracción de materiales o las condiciones de trabajo en las minas, y se discuten posibles soluciones que podrían hacer de estas baterías una opción más justa y sustentable para el futuro del transporte eléctrico.

La era del litio y sus límites

El avance tecnológico en los dispositivos electrónicos inteligentes ha traído como resultado un aumento en la demanda de sistemas de almacenamiento de energía, con una proyección de incre-

mento del 40 % anual a partir de 2025 [1]. El litio se caracteriza por ser un material que permite obtener una alta capacidad de almacenamiento energético; esta es la principal razón por la que los sistemas de

ion-litio han cobrado gran relevancia desde su invención. En 2019 se reconoció a John B. Goodenough, Akira Yoshino y M. Stanley Whittingham con el Premio Nobel de Química por la creación de las baterías de iones de litio, lo que remarca la importancia de esta tecnología.

Sin embargo, entre más inteligente, autónomo y con mayor número de aplicaciones sea un dispositivo electrónico, un vehículo eléctrico o una tecnología portátil (celulares, laptops, relojes, etc.), más energía requerirá para su funcionamiento. Esa demanda ya supera las capacidades actuales de almacenamiento de las baterías de iones de litio, lo que plantea nuevos retos y obliga a buscar alternativas para abastecer las necesidades energéticas. Además, estas nuevas alternativas no solo deben ofrecer una mayor capacidad de almacenamiento, sino también cumplir criterios medioambientales: ser menos contaminantes que la tecnología actual, facilitar el reciclaje al no contener elementos altamente tóxicos, reducir la huella de carbono de su producción y garantizar cadenas de suministro que no se basen en la sobreexplotación laboral ni en zonas de conflicto por recursos, entre otros aspectos.

Nuevas tecnologías de almacenamiento

Existen diversas alternativas a la tecnología actual de baterías recargables de iones de litio. Una de ellas consiste en seguir utilizando litio, pero en sistemas prometedores como las baterías litio-azufre (Li-S) o litio-aire (Li-aire). Otra vía son las tecnologías recargables libres de litio. En este último grupo se encuentran las baterías metal-aire, como las de aluminio-aire, magnesio-aire y zinc-aire (ZABs, por sus siglas en inglés, zinc-air batteries). Estas se caracterizan por ser más económicas que los sistemas de litio, ser recargables y ofrecer una capacidad de almacenamiento energético hasta cinco veces mayor que las baterías de ion-litio (Figura 1) [2].

En la Figura 1 se muestra una representación de un sistema de almacenamiento muy desarrollado (ion-litio), comparado con un sistema emergente

(ZABs). Se resaltan los diseños y el mecanismo de funcionamiento de ambos sistemas. Dado que los dispositivos tecnológicos actuales han sido diseñados alrededor de las baterías de iones de litio, la aplicación de las ZABs en dispositivos portátiles requiere un rediseño. En cambio, en sistemas estacionarios que necesitan grandes cantidades de energía no es necesario modificar tanto la tecnología, por lo que el respaldo de energía para casas, módulos de almacenamiento de vehículos eléctricos terrestres, aéreos y acuáticos [3] es uno de los usos más prometedores.

Las mejoras en capacidad de almacenamiento que presentan las ZABs frente a los sistemas de iones de litio se deben principalmente a que emplean reacciones del oxígeno para oxidar el zinc. Por ello se consideran sistemas con un “cátodo infinito”: mientras haya oxígeno disponible en el ambiente, estas baterías funcionarán hasta oxidar todo el zinc presente en el sistema.

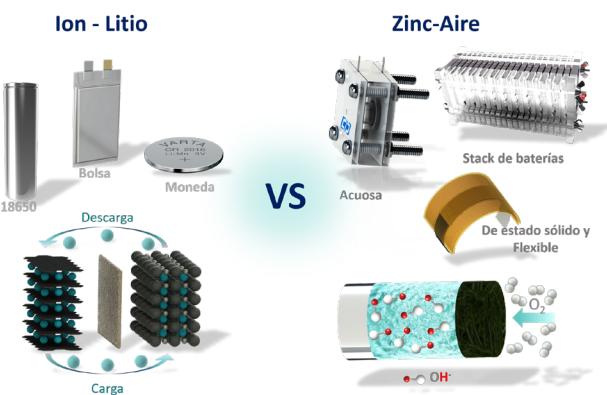


Figura 1. Esquema representativo de diferentes sistemas de almacenamiento energético con potencial para la electromovilidad. Baterías con alto grado de desarrollo (ion-litio) frente a baterías emergentes ecoamigables (zinc-aire).

Impacto ambiental y seguridad del litio y del zinc

Otro aspecto clave para la aplicación y masificación de estas tecnologías es la seguridad, el impacto ambiental y la disposición de residuos al término de su vida útil. Para la extracción de litio se requieren alrededor de 2000 toneladas de agua por cada tonelada de materia prima extraída (Li_2CO_3) [4]. Por otro lado, debido a la baja estabilidad de las baterías

de litio en presencia de humedad, este metal puede reaccionar violentamente, incluso provocar explosiones, y su reciclaje en Estados Unidos se limita a solo 2–5 % [5].

Las ZABs se consideran una tecnología más sustentable y amigable con el ambiente que el litio. Existen métodos de extracción de zinc mediante “minería verde” que gestionan de forma integral el uso de materiales, agua y energía. Además, las ZABs son sistemas seguros que permiten reciclar el zinc empleado para su uso en la industria agrícola, médica, siderúrgica, química y del caucho [6]. Actualmente, alrededor del 35 % del zinc producido proviene del reciclaje. Puede parecer un porcentaje relativamente bajo; sin embargo, esto no se debe a un desinterés en su recuperación, sino a la larga vida útil de muchos productos que contienen zinc [7].

El reto de la electromovilidad

En México y en el mundo, el desarrollo de vehículos eléctricos ha cobrado gran relevancia en los últimos años. No obstante, el kilometraje limitado (autonomías de 400 a 600 km) y los relativamente largos tiempos de carga siguen siendo un reto. Un vehículo eléctrico promedio contiene paquetes de alrededor de 8256 baterías de iones de litio tipo 18650 [8]. Esto hace que siga siendo un desafío desarrollar vehículos más autónomos, con cargas más rápidas, capaces de sustituir por completo a los vehículos de combustión interna (gasolina, diésel o gas).

Entre los avances para superar estos retos hay investigaciones centradas en mejorar la recargabilidad de las baterías, logrando tiempos de vida de hasta 3000 ciclos, equivalentes a unos 8.19 años de uso si se asume que el vehículo se carga una vez al día y en condiciones normales (sin considerar la carga rápida). Otras líneas de trabajo buscan baterías más eficientes que reduzcan el peso y el espacio ocupado por las cubiertas, dejando más volumen para el material activo que almacena la energía. Uno de los mejores sistemas de ion-litio aplicados en vehículos eléctricos es la batería 4680, que presenta una capacidad de almacenamiento energético de 5 mA h cm⁻² [9].

Zinc-aire, más energía en menos espacio

Algunas ZABs desarrolladas por el equipo de trabajo Nanomat-Lab (grupo interinstitucional integrado por investigadoras e investigadores de los centros SECIHTI del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, como el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV, y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, CIDETEQ, así como de la Universidad Autónoma de Querétaro) alcanzan capacidades de almacenamiento de 24 mA h cm⁻² (Figura 2). Mediante modificaciones en el diseño de los electrodos es posible llegar al menos a 625 mA h cm⁻², según algunos fabricantes [10]. Esto supone un aumento de hasta 125 veces en la autonomía respecto a los mejores sistemas de litio, al utilizar ZABs parcialmente optimizadas.

En la Figura 2 se muestra el módulo de almacenamiento energético de un vehículo eléctrico basado en baterías de ion-litio. Al reemplazarlo por ZABs, este módulo podría reducirse en tamaño y peso, lo que optimiza la eficiencia y la potencia del vehículo, o bien mantener el mismo volumen para obtener tiempos de autonomía mucho mayores.

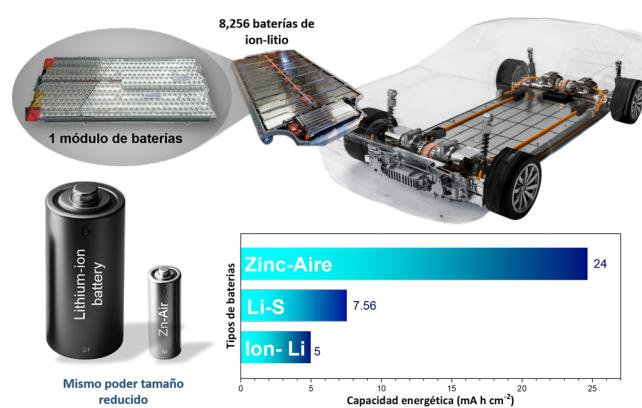


Figura 2. Módulo de almacenamiento energético de vehículos eléctricos y comparativa de la energía almacenada en baterías de litio frente a baterías de zinc-aire.

Capacidad y voltaje en las baterías

No obstante, la capacidad energética no es el único factor que determina la viabilidad de estos

sistemas; también es importante considerar el voltaje de las baterías. La capacidad de almacenamiento energético indica cuántas cargas (electrones, en este caso) pueden transferirse en un tiempo determinado, mientras que el voltaje es la “fuerza” con la que esas cargas se mueven.

Podemos imaginarlo con una manguera de agua: las cargas serían la cantidad de agua que pasa por la manguera y el voltaje sería la presión con la que sale. Hay aplicaciones que requieren alta presión y poca agua (como el lavado de objetos) y otras que necesitan baja presión pero gran flujo (como el llenado de un recipiente).

El voltaje de operación de los sistemas de ion-litio es de aproximadamente 3 V, mientras que el de las ZABs es de solo 1.4 V. Esto plantea desafíos para los sistemas de almacenamiento enfocados a la movilidad eléctrica, donde se requieren alrededor de 400 V para vehículos comunes y hasta 800 V para vehículos de alta potencia [11].

Una alternativa es conectar las baterías en serie, de modo que se suma el voltaje de cada celda individual. Para lograr 400 V en un vehículo eléctrico de uso común se necesitarían configuraciones de alrededor de 134 baterías de ion-litio o 286 ZABs. Aunque las ZABs requieren un poco más del doble de celdas para alcanzar los 400 V, la capacidad específica sería unas 63 veces mayor, lo que evidencia la viabilidad de las ZABs para su aplicación en el transporte eléctrico.

Diseño y operación de las ZABs en condiciones extremas

A diferencia de las baterías de iones de litio, las ZABs requieren un flujo constante de oxígeno para oxidar el zinc metálico y generar energía eléctrica. Además, deben mantenerse en rangos de temperatura adecuados para evitar la evaporación o la congelación del agua contenida en el electrolito (el medio líquido o gel que conduce los iones dentro de la batería). Estas condiciones representan desafíos para su uso en entornos adversos.

Sin embargo, un diseño adecuado de la batería permite incluso sumergir el sistema durante largos períodos sin comprometer su funcionamiento, a

pesar de la baja concentración de oxígeno disuelto en el agua. Las modificaciones en el electrolito, como el uso de geles poliméricos superadsorbentes, aumentan la eficiencia de la ZAB, reducen la evaporación del electrolito y evitan su congelación. Estos geles son una alternativa prometedora para ampliar el rango de temperatura de operación desde -20 °C hasta 100 °C (Figura 3) [12].

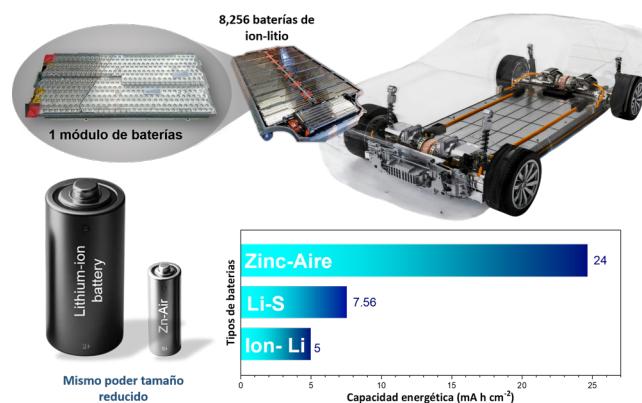


Figura 3. Principales características de las baterías de zinc-air que favorecen su uso práctico en la electromovilidad.

Materiales más responsables, del cobalto al nopal

A pesar de todas las mejoras mencionadas, las ZABs todavía enfrentan algunas problemáticas que deben resolverse para su aplicación masiva. Una de ellas está relacionada con el desarrollo de materiales capaces de llevar a cabo las reacciones del oxígeno. A estos materiales se les conoce comúnmente como electrocatalizadores, y deben ser muy estables, económicos, ecoamigables y socialmente responsables.

Durante mucho tiempo, el cobalto se ha utilizado en sistemas de almacenamiento de energía porque ofrece un buen desempeño tanto en baterías de ion-litio como en ZABs. Sin embargo, su extracción representa una problemática social y ambiental. Las mayores reservas de este metal se encuentran en África, donde se han documentado sobreexplotación laboral, trabajos forzados, explotación infantil, desplazamiento de comunidades indígenas, uso intensivo de agua y contaminación del entorno [13].

Mientras que las baterías de litio pueden incorporar hasta un 20 % en peso de cobalto [14], las ZABs pueden funcionar sin este metal e incluso

alcanzar mejor desempeño al emplear electrocatalizadores a base de níquel-hierro [15] o de carbón (que puede provenir de fuentes naturales o de materiales de desecho).

Otra problemática se relaciona con el desarrollo de geles poliméricos, también llamados electrolitos de estado cuasi sólido (QSE, por sus siglas en inglés, quasi-solid-state electrolytes). En muchos casos estos geles se elaboran a partir de polímeros poco degradables y económicamente poco viables. Por ello, algunas investigaciones se centran en QSE biodegradables elaborados con biopolímeros, con la intención de igualar el rendimiento de los polímeros sintéticos.

Pese a estos esfuerzos, pocos QSE presentan propiedades adecuadas para ser aplicados en ZABs, ya que suelen ser inestables en medios corrosivos, absorber poca cantidad de electrolito, romperse con facilidad o requerir grandes cantidades de materia prima para obtener volúmenes aceptables de polímero.

En este contexto, el mucílago —un biopolímero presente en la “baba” del nopal— tiene el potencial de emplearse como QSE e incluso superar el desempeño de algunos sistemas sintéticos. Esto no solo reduce el impacto ambiental de las ZABs, sino que también representa una oportunidad para México, el mayor productor de nopal en el mundo, al ampliar las aplicaciones de este cultivo. Según un informe de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) de 2018, solo el 46.4 % de los nopales cultivados en México se aprovecha, debido a la sobreproducción [16].

Conclusiones

Las ZABs son una alternativa sustentable e innovadora que permite mejorar los sistemas de almacenamiento energético, minimizando los costos de producción y el impacto ambiental en comparación con los sistemas de ion-litio. Estas características las convierten en uno de los principales prospectos para sustituir al litio en los sistemas de almacenamiento de energía destinados a la electromovilidad.

Referencias

- [1] A. Razmjoo et al., “Moving Toward the Expansion of Energy Storage Systems in Renewable Energy Systems—A Techno-Institutional Investigation with Artificial Intelligence Consideration,” *Sustainability*, vol. 16, no. 22, p. 9926, Nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/SU16229926>.
- [2] Y. Li and H. Dai, “Recent advances in zinc-air batteries,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 15, pp. 5257–5275, Jul. 2014, doi: <https://doi.org/10.1039/C4CS00015C>.
- [3] “Zinc-Air Batteries Will Extend Mission Times Of NASA Micro Aerial Vehicles.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2005-06-zinc-air-batteries-mission-nasa-micro.html>
- [4] W. F. Díaz Paz et al., “The water footprint of lithium extraction technologies: Insights from environmental impact reports in Argentina’s salt flats,” *Heliyon*, vol. 11, no. 4, p. e42523, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42523>.
- [5] Z. Dobó, T. Dinh, and T. Kulcsár, “A review on recycling of spent lithium-ion batteries,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 6362–6395, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.264>.
- [6] M. Anik Hasan, R. Hossain, and V. Sahajwalla, “Critical metals (Lithium and Zinc) recovery from battery waste, ores, brine, and steel dust: A review,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 178, pp. 976–994, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.069>.
- [7] M. Kaya, S. Hussaini, and S. Kursunoglu, “Critical review on secondary zinc resources and their recycling technologies,” *Hydrometallurgy*, vol. 195, p. 105362, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105362>.
- [8] P. N. Halimah, S. Rahardian, and B. A. Budiman, “Battery Cells for Electric Vehicles,” *International Journal of Sustainable Transportation Technology (IJSTT)*, vol. 2, no. 2, pp. 54–57, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.31427/IJSTT.2019.2.2.3>.
- [9] M. Ank et al., “Lithium-Ion Cells in Automotive Applications: Tesla 4680 Cylindrical Cell Teardown and Characterization,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 170, no. 12, p. 120536, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad14d0>.
- [10] “Global Product Technical Data Sheets - Duracell Batteries | AA, AAA, Rechargeable, Coin Button.” Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.duracell.com/en-us/techlibrary/product-technical-data-sheets/>
- [11] “Voltaje de la batería de un coche eléctrico | Volkswagen España.” Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.volkswagen.es/es/revista/innovacion/voltaje-bateria-coche-electrico.html>
- [12] P. Zhang et al., “A self-designed double cross-linked gel for flexible zinc-air battery with extreme conditions adaptability,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 451, p. 138622, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138622>.
- [13] “African leaders call for equity over minerals used for clean energy | Environment | The Guardian.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/environment/2024/feb/28/african-leaders-call-for-equity-over-minerals-used-for-clean-energy>
- [14] C. Peng, F. Liu, A. T. Aji, B. P. Wilson, and M. Lundström, “Extraction of Li and Co from industrially produced Li-ion battery waste – Using the reductive power of waste itself,” *Waste Management*, vol. 95, pp. 604–611, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.048>.

[15] O. Ambriz-Peláez, J. Béjar, C. M. Ramos-Castillo, M. Guerra-Balcázar, L. Álvarez-Contreras, and N. Arjona, "Defected NiFe layered double hydroxides on N-doped carbon nanotubes as efficient bifunctional electrocatalyst for rechargeable zinc-air batteries," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 601, p. 154253, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2022.154253>.

[16] M. M. López Flores y J. M. Omaña Silvestre, "Modelo de desarrollo para el aprovechamiento de nopal verdura en Milpa Alta, Ciudad de México," *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, vol. 20, no. 4, pp. 408–424, 2023, doi: <https://doi.org/10.22231/asyd>.

