

Recibido 7 de julio de 2025. Aceptado 25 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.

ISSN: 2448-7775

Batería li-ion 2d con líneas 1d de electrolito sólido llzto y ánodo/cátodo de materiales compuestos

ALDO ELIZARRARAZ PEREZ¹, JOSÉ DE JESÚS PÉREZ BUENO¹, IVÁN A. HERNÁNDEZ ROBLES²

¹CIDETEQ.

²Universidad de Guanajuato.

*Autor de correspondencia: aelizarraraz@cideteq.mx

RESUMEN El estudio se centra en el desarrollo y la evaluación de baterías de iones de litio con un diseño bidimensional (2D), dispuestas en el mismo plano X-Y, que incorporan líneas unidimensionales (1D) de electrolito sólido LLZTO (Óxido de zirconio litio-lantano dopado con tantalio). Para el cátodo y el ánodo se emplearon nanomateriales y materiales compuestos, incluidos materiales reciclados procedentes de baterías Li-ion desechadas.

PALABRAS CLAVE — Batería de iones de litio, batería de estado sólido, electrolito sólido.

I. INTRODUCCIÓN

Las baterías de iones de litio (Li-ion) son actualmente la tecnología dominante en el almacenamiento de energía para dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. Estas baterías destacan por su alta densidad de energía, larga vida útil y baja tasa de autodescarga, lo que las hace ideales para una amplia gama de aplicaciones.

En 2020, el mercado global de baterías de iones de litio se valoró en USD 30.2 mil millones, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) proyectada del 18.0% para alcanzar USD 92 mil millones en 2026 [1]. Sin embargo, el rápido crecimiento de esta tecnología ha puesto de manifiesto una serie de problemas asociados a su producción, rendimiento y reciclaje.

PROBLEMÁTICA DE LAS BATERÍAS DE LITIO

A. Degradación del rendimiento y seguridad

Uno de los principales desafíos técnicos de las baterías de litio es la degradación de su rendimiento con el tiempo. La capacidad de una batería de litio en algunos vehículos eléctricos puede disminuir hasta un 35% después de 500 ciclos [2], lo que conduce, eventualmente, a una reducción de su vida útil. Además, problemas como el sobrecalentamiento, la formación de dendritas y el riesgo de fuga térmica representan amenazas para la seguridad.

B. Sobrecalentamiento y riesgos de incendio

Las baterías de litio pueden presentar fugas térmicas al sobrecalentarse, lo que puede provocar incendios o explosiones. La producción de baterías depende de materiales escasos como el litio, el cobalto y el níquel, cuya extracción tiene implicaciones ambientales y sociales importantes. Según estimaciones, la demanda de litio se cuadruplicará para 2040 [1].

C. Impacto ambiental

La extracción de estos materiales también genera impactos ambientales relevantes, como la contaminación del agua y la destrucción de hábitats naturales, especialmente en países donde se extraen estos metales, como Bolivia y la República Democrática del Congo [1].

La demanda de baterías de litio se ha disparado debido a la adopción masiva de vehículos eléctricos. Se espera que la demanda global de litio (como mineral) para baterías alcance 1.79 millones de toneladas métricas de equivalente de carbonato de litio para 2030 [1].

Se estima que para 2040 la demanda de litio aumentará un 600% y la de cobalto crecerá un 500%, debido al incremento de la producción de vehículos eléctricos y de sistemas de almacenamiento de energía [1].

Actualmente, aún no existe una norma mexicana específica que regule la disposición de los desechos de baterías de litio ni su adecuado reciclaje.

II. BATERÍAS DE DOS DIMENSIONES

A. Desarrollo de baterías de litio en dos dimensiones

El desarrollo de baterías de litio basadas en materiales bidimensionales (2D) ha emergido como un enfoque prometedor para superar las limitaciones de las baterías tradicionales de iones de litio en términos de densidad de energía, flexibilidad y estabilidad estructural. En este contexto, los materiales bidimensionales, como el grafeno, el disulfuro de molibdeno (MoS_2) y otros compuestos como el LLZTO (óxido de zirconio litio lantano dopado con tantalio), ofrecen propiedades únicas que pueden mejorar el desempeño electroquímico de las baterías actuales [2], [3].

B. LLZTO como electrolito sólido

El $Ta - Li_7La_3Zr_2O_{12}$ (LLZTO, óxido de zirconio Lantano Litio dopado con Tantalio) es un electrolito sólido ampliamente investigado para su uso en baterías de iones de litio, debido a sus atractivas propiedades físicas y electroquímicas, tales como su alta conductividad iónica [4], [5], alta estabilidad química y electroquímica [6]–[8], baja reactividad con el litio metálico y estructura cristalina estable a temperatura ambiente [4], [5], [9].

El LLZTO actúa como electrolito sólido debido a su capacidad para mantener la movilidad de los iones de litio dentro de su estructura cristalina. A diferencia de los electrolitos líquidos, los sólidos mejoran la estabilidad y la seguridad de la batería al reducir riesgos, como los cortocircuitos provocados por la formación de dendritas [10].

C. Diseño de la batería de litio 2D

Como propuesta de diseño, se emplean tres materiales: un ánodo, un cátodo y el electrolito sólido de LLZTO, como se muestra en la Fig. 1.

Para este diseño inicial se seleccionó un sustrato rígido e inerte para depositar las películas de los diferentes materiales. Se utilizaron portaobjetos de vidrio, dado que presentan adecuada rigidez mecánica, soportan un amplio rango de temperaturas, tienen muy baja rugosidad y son eléctricamente aislantes.

Como material anódico, se usó $LiFePO_4$, el cual, al ser reemplazado por el litio metálico, permite un manejo más estable y seguro a temperatura ambiente y en atmósfera de aire. Como material catódico se utilizó grafito, ampliamente empleado en baterías de litio [11].

III. METODOLOGÍA

La implementación del diseño 2D se logró mediante la deposición de electrolitos y electrodos con plasma a presión atmosférica (APPJ).

A. Deposición individual de componentes por plasma

Para depositar el material sobre el sustrato, fue necesario preparar una solución que contuviera el material que conformaría la película. Para ello, se empleó agua desionizada con una concentración de 0.2 g del material, el cual se agitó en un baño ultrasónico durante 1 h.

Como segundo paso, se evaluó si la solución era adecuada para el proceso de deposición por plasma. La prueba consistió en verificar que se generara una niebla uniforme a través de un tubo de plástico de medio metro de largo y una pulgada de diámetro. Para esta prueba se utilizó un nebulizador ultrasónico tipo hospitalario, modelo WH-2000, marca YUE HUA. Como sustrato, se utilizaron portaobjetos de vidrio sin tratamiento adicional.

Previo a la deposición, se realizó una limpieza del sustrato con el mismo plasma para eliminar polvo o suciedad no visibles a simple vista. Para todas las muestras, se aplicó

una limpieza e hidrofiliación, con tratamiento de superficie mediante un jet de plasma durante 1 min.

Una vez realizada la limpieza e hidrofiliación por APPJ, para el depósito y la formación de la película se activan el chorro de plasma y el nebulizador.

El protocolo para la deposición fue el siguiente: (i) 60 s de limpieza, (ii) 20 s de plasma con la niebla del nebulizador y (iii) 40 s solo de plasma. Estos dos últimos pasos se repitieron cuatro veces. Las películas de (a) LLZTO, (b) $LiFePO_4$ y (c) grafito se muestran en la Fig. 2.

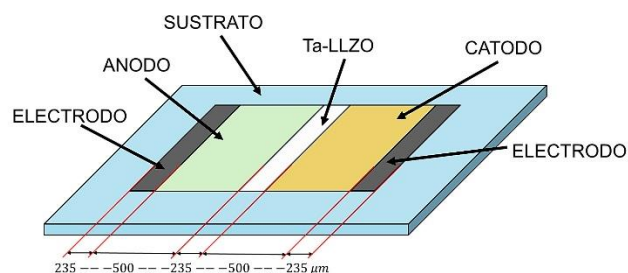


Fig. 1. Diseño de batería de litio 2D con capas sucesivas.

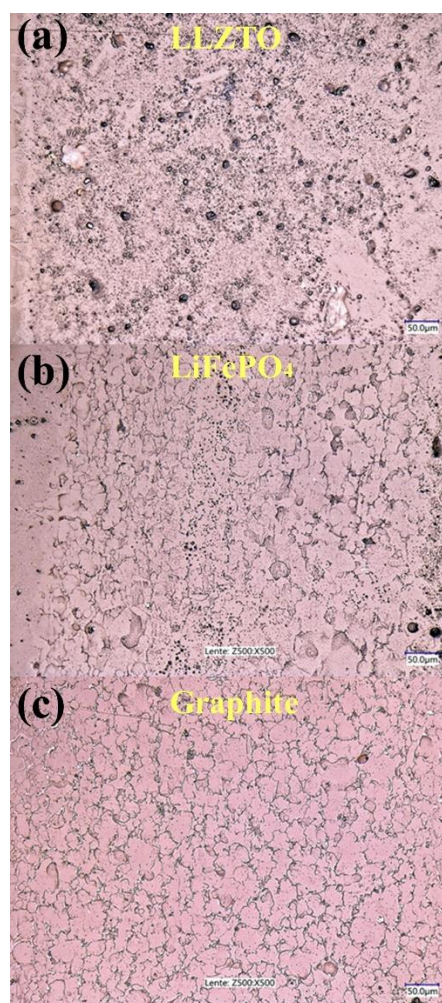


Fig. 2. Microscopía óptica a 500x de (a) LLZTO, (b) $LiFePO_4$ y (c) grafito.

Una vez obtenidos los depósitos individuales necesarios para la batería, se procede a realizar los depósitos de las capas sucesivas mostradas en el diseño 01 de la Fig. 1, dando el siguiente resultado (Fig. 3).

IV. CARACTERIZACIÓN

Para confirmar la formación de un depósito uniforme, adecuado para una batería bidimensional, se realizó la caracterización mediante microscopía SEM a 5000×, lo que permitió observar la rugosidad y la homogeneidad de las películas depositadas (Fig. 4). Como se observa en las Figs. 4b y 4c, los depósitos presentan una morfología homogénea, lo que indica que son materiales aptos para la fabricación de una batería 2D. En cuanto al electrolito sólido LLZTO, se identificó una menor uniformidad en la película, que podría mejorarse ajustando el número de capas depositadas, reduciéndolo de cuatro a tres.

V. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad técnica de fabricar una batería de iones de litio de estado sólido con diseño bidimensional, mediante la tecnología de plasma APPJ, empleando un sustrato rígido e inerte a temperatura ambiente y en atmósfera de aire. Los resultados de caracterización evidencian que los depósitos de grafito y LiFePO_4 presentan una buena uniformidad superficial, adecuada para su integración en arquitecturas 2D multicapa. En el caso del LLZTO, se comprobó su factibilidad como electrolito sólido funcional, destacando su adherencia al sustrato y su estabilidad estructural en las condiciones de deposición empleadas.

Se verificó la efectividad del protocolo de limpieza con plasma para garantizar superficies libres de contaminantes previas a la deposición, lo que contribuyó a mejorar la calidad de la interfaz entre capas. La metodología implementada permitió obtener películas individuales y ensamblajes en capas sucesivas, reproduciendo de manera controlada la disposición según el diseño propuesto. Estos resultados confirman la robustez del proceso APPJ como una alternativa versátil para la obtención de materiales activos y electrolitos sólidos, manteniendo propiedades físico-químicas favorables para dispositivos de almacenamiento de energía de configuración bidimensional.

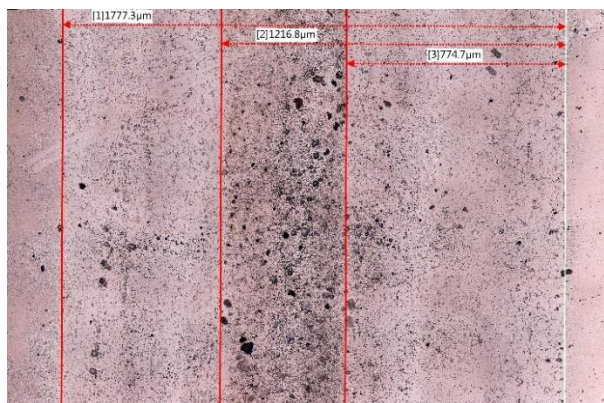


Fig. 3. Microscopía óptica a 500x de la batería de litio con capas sucesivas, de izquierda a derecha: grafito, LLZTO y LiFePO_4 , (a) sin y (b) con medición.

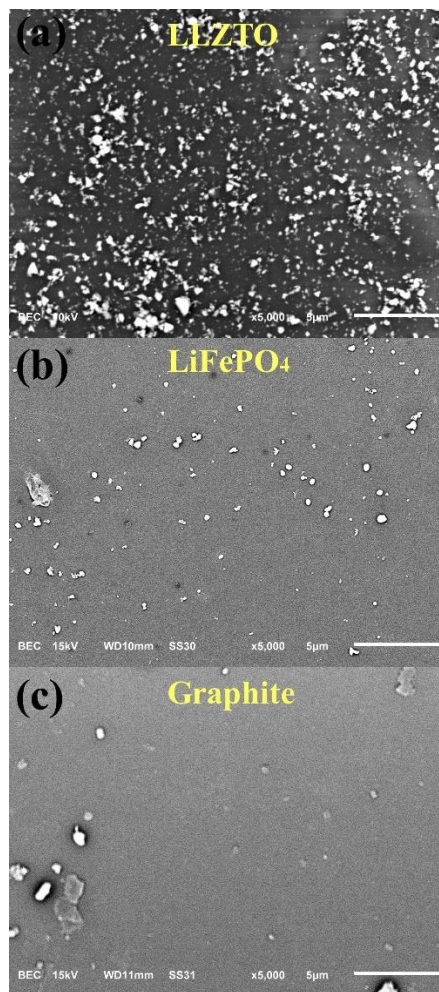


Fig. 4. Micrografía electrónica SEM (electrones retrodispersos) a 5000x de (a) LLZTO, (b) LiFePO_4 y (c) grafito.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2025 Expanding sales in diverse markets," 2025. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (accessed Oct. 10, 2025).
- [2] Y. He, X. Shen, and Y. Zhang, "Layered 2D Materials in Batteries," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 7, no. 24, pp. 27907–27939, Dec. 2024, doi: 10.1021/acsanm.3c06242.
- [3] Q. Ma et al., "2D Materials for All-Solid-State Lithium Batteries," *Adv. Mater.*, vol. 34, no. 16, Apr. 2022, doi: 10.1002/adma.202108079.
- [4] M. Curcio, S. Brutti, A. Celeste, A. Galasso, A. De Bonis, and R. Teghil, "Influence of Deposition Conditions and Thermal Treatments on Morphological and Chemical Characteristics of $\text{Li}_6.75\text{La}_3\text{Zr}_{1.75}\text{Ta}_{0.25}\text{O}_{12}$ Thin Films Deposited by Nanosecond PLD," *Coatings*, vol. 13, no. 9, p. 1496, Aug. 2023, doi: 10.3390/coatings13091496.
- [5] J. P. Singh, A. K. Paidi, and S. Lee, "Growth strategies of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ electrolytes for Li-ion thin film battery," *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 16, p. 100532, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.100532.
- [6] T. Wu, S. Guo, B. Li, C. Shen, X. Liu, and A. Cao, "Garnet-type solid-state electrolytes: crystal structure, interfacial challenges and controlling strategies," *Rare Met.*, vol. 42, no. 10, pp. 3177–3200, Oct. 2023, doi: 10.1007/s12598-023-02323-y.
- [7] A. V. Morozov et al., "Thermodynamics as a Driving Factor of LiCoO_2 Grain Growth on Nanocrystalline Ta-LLZO Thin Films for All-Solid-State Batteries," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, no. 35, pp. 39907–39916, Sep. 2022, doi: 10.1021/acsami.2c07176.
- [8] Q. Guo et al., "20 µm-Thick $\text{Li}_6.4\text{La}_3\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$ -Based Flexible Solid Electrolytes for All-Solid-State Lithium Batteries," *Energy Mater. Adv.*, vol. 2022, Jan. 2022, doi: 10.34133/2022/9753506.
- [9] B. Wu, C. Chen, D. L. Danilov, R.-A. Eichel, and P. H. L. Notten, "All-Solid-State Thin Film Li-Ion Batteries: New Challenges, New Materials, and New Designs," *Batteries*, vol. 9, no. 3, p. 186, Mar. 2023,

doi: 10.3390/batteries9030186.

- [10] W. Zaman and K. B. Hatzell, "Processing and manufacturing of next generation lithium-based all solid-state batteries," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 26, no. 4, p. 101003, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cossms.2022.101003.
- [11] J. Zhang, H. Huang, G. Zhang, Z. Dai, Y. Wen, and L. Jiang, "Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review," *J. Energy Storage*, vol. 93, p. 112231, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112231.

BIOGRAFÍAS



ALDO ELIZARRARAZ PEREZ Ingeniero Mecatrónico de la Universidad de Guanajuato, DICIS, originario de la ciudad de Irapuato, Gto. Investigador en la aplicación de nanomateriales gráficos en celdas fotovoltaicas, celdas termoeléctricas e hidrógeno fotocatalítico en CINERGIA UG; fundador de una empresa de energías renovables; estudiante de maestría en electroquímica del CIDETEQ en baterías de litio

de estado sólido.



JOSÉ DE JESÚS PÉREZ BUENO Obtuvo su doctorado en Ingeniería, especialidad en Materiales, por la Universidad Autónoma de Querétaro, tras obtener su Licenciatura y su Maestría en Física en la Universidad Autónoma de Zacatecas y en el CINVESTAV-IPN, respectivamente. Inició su carrera internacional como Investigador Asociado en el Instituto de Tecnología de Polímeros e Ingeniería de Materiales de la Universidad de

Loughborough (Reino Unido), donde trabajó en materiales híbridos orgánico-inorgánicos para aplicaciones fotónicas. Desde 2003, es Investigador Titular del CIDETEQ, con especialización en procesos

electroquímicos, recubrimientos por sol-gel, nanomateriales y tecnologías sustentables para aplicaciones energéticas y ambientales. Es Investigador Nacional (SNII Nivel III), autor de 115 publicaciones indexadas (más de 2000 citas), 10 artículos nacionales, 22 capítulos de libros y 3 libros, y coinventor de 12 patentes concedidas. Ha graduado a 115 estudiantes de licenciatura, 20 de maestría y 12 de doctorado; ha supervisado a 7 investigadores posdoctorales y ha sido mentor de 49 estudiantes de verano. Su investigación le ha valido dieciséis premios a nivel estatal, nacional e internacional, incluyendo el Premio Alejandrina de la UAQ (tres veces), la Medalla a la Innovación, el Premio TECNOS y el Premio PRODETES – Categoría Plata (Banco Mundial/SENER), que apoyó la instalación de un sistema industrial de producción de nanorecubrimientos y espejos solares. En 2022, recibió en Querétaro, México, el Premio Estatal de Ciencia y Tecnología y el Premio al Mérito Empresarial, en reconocimiento a su impacto en la investigación, la innovación tecnológica y la sostenibilidad.



IVÁN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES Obtuvo el título de licenciatura en Ingeniería Eléctrica por parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Guanajuato, la Maestría en Ciencias y el Doctorado en especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia en la institución CINVESTAV, Unidad Guadalajara, con Estancia Doctoral en el Instituto Politécnico de Nueva York. Se ha desempeñado en

el ramo de la construcción eléctrica en empresas del Estado de Jalisco como ingeniero de proyectos eléctricos en baja y media tensión; se ha desempeñado como ingeniero de diseño de transformadores en una empresa internacional, así como como ingeniero de proyectos en el desarrollo de nuevos productos, trabajando en el diseño y optimización de motores y generadores lineales. Actualmente está adscrito a la Universidad de Guanajuato, al departamento de Ingeniería Eléctrica y al Centro Interinstitucional de Energía de la Universidad de Guanajuato (CINERGIA UG). Sus líneas de investigación y desarrollo son: diseño de máquinas eléctricas, electromagnetismo, energías alternativas y limpias y simulación aplicada al diseño de máquinas eléctricas.