Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/q0s8fb78

Baterías de estado sólido: nuevos materiales para el almacenamiento de energía

Solid-state batteries: new materials for energy storage

Batterie a stato solido: nuovi materiali per l'accumulo di energia

Kevin Miguel Bajaña Chinga[I]
kbajanac7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3414-737X
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Johan Deyvid Cauja Ostaiza[I]
jcaujao@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0646-5987
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Nayerli Anahi Espinoza Granda[I]
nespinozag7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3610-3389
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Xiomara Leonela León Paredes[I]
xleonp2@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6528-7337
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jorge Tomas Holguin Anzules[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Correspondencia: xleonp2@unemi.edu.ec

Artículo de Investigación

.

***Aceptado:** 26, Noviembre, 2026 *** Publicado:** 27, Noviembre, 2026

I. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

Resumen

Las baterías de estado sólido sustituyen el electrolito líquido inflamable de las baterías de ion litio por un conductor iónico sólido, lo que promete mayor seguridad y mayores densidades de energía. El objetivo de este trabajo fue comparar, mediante una revisión documental, las principales familias de electrolitos sólidos (sulfuros, óxidos, halogenuros y polímeros) según su conductividad iónica, su estabilidad, su comportamiento en las interfaces y su viabilidad de fabricación. Se analizaron 20 fuentes arbitradas, entre artículos originales y revisiones, y su información se organizó en categorías de análisis comunes. Los sulfuros alcanzan conductividades de 12 a 25 mS/cm, comparables o superiores a las de los electrolitos líquidos, pero su estabilidad frente a los electrodos es limitada; los óxidos tipo granate son robustos, aunque sus primeros reportes indican conductividades cercanas a 10^{-4} S/cm; los halogenuros combinan deformabilidad y estabilidad frente a cátodos de 4 V; y los polímeros basados en óxido de polietileno requieren temperaturas elevadas para operar. Se concluye que ninguna familia satisface por sí sola todos los requisitos y que los principales cuellos de botella se han desplazado de la conductividad volumétrica hacia las interfaces, el ánodo de litio metálico y la manufactura a escala.

Palabras clave: Baterías de estado sólido, electrolitos sólidos, almacenamiento de energía, conductividad iónica, densidad energética.

Abstract

Solid-state batteries replace the flammable liquid electrolyte in lithium-ion batteries with a solid ionic conductor, offering the prospect of improved safety and higher energy densities. This literature review compared the main families of solid electrolytes (sulfides, oxides, halides, and polymers) in terms of ionic conductivity, stability, interfacial behavior, and manufacturing feasibility. Twenty peer-reviewed sources, including original studies and reviews, were analyzed using common categories. Sulfides reach conductivities of 12 to 25 mS/cm, comparable to or greater than those of liquid electrolytes, but have limited stability in contact with electrodes. Garnet-type oxides are robust, although early reports indicate conductivities close to 10^{-4} S/cm. Halides combine deformability with stability against 4 V cathodes, and polyethylene oxide-based polymers require elevated operating temperatures. No single family meets all requirements, and the main bottlenecks have shifted from bulk conductivity to interfaces, lithium metal anodes, and manufacturing at scale.

Keywords: solid-state batteries; solid electrolytes; energy storage; ionic conductivity; energy density.

Riassunto

Le batterie a stato solido sostituiscono l'elettrolita liquido infiammabile delle batterie agli ioni di litio con un conduttore ionico solido, con la prospettiva di una maggiore sicurezza e di densità energetiche più elevate. Questa rassegna bibliografica ha confrontato le principali famiglie di elettroliti solidi (solfuri, ossidi, alogenuri e polimeri) in termini di conducibilità ionica, stabilità, comportamento alle interfacce e fattibilità produttiva. Sono state analizzate 20 pubblicazioni sottoposte a revisione tra pari, tra cui studi originali e rassegne, utilizzando categorie comuni. I solfuri raggiungono conducibilità comprese tra 12 e 25 mS/cm, comparabili o superiori a quelle degli elettroliti liquidi, ma mostrano una stabilità limitata a contatto con gli elettrodi. Gli ossidi di tipo granato sono robusti, sebbene i primi studi riportino conducibilità vicine a 10^{-4} S/cm. Gli alogenuri combinano deformabilità e stabilità nei confronti dei catodi a 4 V, mentre i polimeri a base di ossido di polietilene richiedono temperature operative elevate. Nessuna famiglia soddisfa da sola tutti i requisiti e le principali criticità si sono spostate dalla conducibilità del materiale alle interfacce, all'anodo di litio metallico e alla produzione su scala industriale.

Parole chiave: batterie a stato solido; elettroliti solidi; accumulo di energia; conducibilità ionica; densità energetica.

1. Introducción

Las baterías de ion litio son hoy la tecnología dominante para el almacenamiento electroquímico de energía, desde la electrónica portátil hasta la movilidad eléctrica. Sin embargo, su diseño actual depende de electrolitos líquidos orgánicos inflamables, y los retos de seguridad y de rendimiento de los materiales de las baterías recargables de litio se conocen desde hace más de dos décadas (Tarascon y Armand, 2001). Esta combinación limita tanto la energía que puede almacenarse por unidad de volumen como la seguridad de operación del sistema.

Las baterías de estado sólido proponen reemplazar el electrolito líquido y el separador por un conductor iónico sólido. Janek y Zeier (2016) presentaron esta tecnología como una vía prometedora para el desarrollo de baterías, y Manthiram et al. (2017) mostraron que los electrolitos sólidos permiten además nuevas químicas de batería. Entre las ventajas esperadas se cuentan la reducción del riesgo de incendio y la posibilidad de emplear un ánodo de litio metálico, clave para alcanzar altas densidades de energía a bajo costo (Albertus et al., 2018; Zhao et al., 2020).

Para que un electrolito sólido cumpla su función debe reunir, de forma simultánea, una conductividad iónica alta, una conductividad electrónica despreciable, estabilidad química y electroquímica frente a los electrodos, compatibilidad mecánica en las interfaces y una vía de fabricación viable (Bachman et al., 2016; Zhao et al., 2020). Ningún material conocido satisface

por completo todos estos requisitos, por lo que el campo se ha organizado en familias con perfiles de compromiso distintos. Además de la seguridad, Manthiram et al. (2017) destacan que los electrolitos sólidos abren la puerta a químicas de batería que no son viables con electrolitos líquidos, de modo que su interés no se limita a sustituir el electrolito de la celda de ion litio actual.

El interés creció de forma notable cuando se demostró que un sólido podía igualar o superar la conductividad de un líquido. Kamaya et al. (2011) reportaron un conductor superiónico de litio y Kato et al. (2016) lo llevaron a baterías de alta potencia. A partir de entonces se consolidaron varias familias de materiales, cuyos mecanismos de conducción y propiedades han sido sistematizados en revisiones de referencia (Bachman et al., 2016; Famprikis et al., 2019).

A pesar de estos avances, la transición hacia productos comerciales no está resuelta. Janek y Zeier (2023) señalan que, cerca de una década después de los primeros electrolitos sólidos más conductores que los líquidos, persisten problemas de desempeño a largo plazo, de potencia específica y de viabilidad económica. A ello se suma un desafío propio de la ingeniería industrial: la producción a gran escala exige cadenas de proceso nuevas o adaptadas, con requisitos de calidad y de costo distintos a los de la celda convencional (Schnell et al., 2018).

La relevancia del tema para la ingeniería industrial va más allá del material. Una tecnología de almacenamiento solo llega al mercado si puede producirse con calidad repetible, a un costo competitivo y con una cadena de proceso controlable. Por eso, comparar electrolitos únicamente por su conductividad ofrece una imagen incompleta, y resulta útil situar cada familia en un marco que incluya la estabilidad, las interfaces y la viabilidad de fabricación. Este es el enfoque que se adopta aquí.

Las fuentes revisadas suelen centrarse en una familia de materiales o en un aspecto concreto, como las interfaces o la manufactura. Este trabajo las integra bajo criterios comunes y con una lectura desde la ingeniería industrial. En este contexto, el presente artículo compara las principales familias de electrolitos sólidos de litio y examina cómo se relacionan sus propiedades con las interfaces y con la manufactura. La pregunta que guía el trabajo es: ¿qué compromisos de conductividad, estabilidad y procesabilidad presentan los materiales actuales y cuáles son los principales obstáculos para su aplicación industrial? El documento se organiza en metodología, resultados por familia de material, discusión y conclusiones.

2. Metodología

Se realizó una revisión narrativa documental, de enfoque cualitativo y alcance descriptivo-comparativo, sin un protocolo sistemático de búsqueda en bases de datos. La unidad de análisis fueron artículos científicos arbitrados sobre electrolitos sólidos de litio, sus interfaces y su fabricación. El corpus quedó constituido por 20 documentos publicados entre 2001 y 2023,

seleccionados intencionalmente para incluir tanto trabajos experimentales fundacionales como revisiones críticas. El corte en 2023 delimita el estado de la literatura examinado y coincide con la revisión de Janek y Zeier (2023); no implica que se hayan analizado publicaciones posteriores ni que se haya ejecutado una búsqueda exhaustiva hasta esa fecha.

Los criterios de inclusión fueron: (a) publicación en revista arbitrada; (b) relación directa con electrolitos sólidos inorgánicos o poliméricos para baterías de litio, sus interfaces, desempeño de celda o manufactura; (c) datos experimentales cuantitativos o una síntesis crítica verificable; y (d) DOI identificable. Se excluyeron documentos sin revisión por pares, notas de prensa y patentes. Los trabajos originales se priorizaron cuando introducían una composición o arquitectura de referencia, ofrecían valores de conductividad, desempeño o ciclos con condiciones de ensayo identificables, o demostraban un avance relevante. Las revisiones críticas se eligieron por su cobertura de mecanismos, estabilidad interfacial, comparaciones de desempeño y fabricación. La selección procuró representar las cuatro familias comparadas y sus problemas transversales, no estimar estadísticamente toda la producción bibliográfica.

Las referencias se gestionaron con Zotero y se redactaron con el estilo APA 7.ª edición. De cada fuente se extrajo, cuando estaba disponible, información de cuatro categorías: (1) conductividad iónica y temperatura de medición, (2) estabilidad electroquímica y química, (3) comportamiento en las interfaces y (4) viabilidad de fabricación. Las conductividades de la Tabla 1 y la Figura 1 se expresan en mS/cm (1 S/cm = 1000 mS/cm). Los valores se convierten únicamente para unificar la unidad, conservando las cifras significativas aproximadas y las condiciones de ensayo reportadas. Las diferencias de configuración y temperatura impiden comparaciones directas de rendimiento entre materiales. No se aplicó metaanálisis.

El análisis siguió cuatro pasos. Primero, se identificaron los materiales, los diseños de celda y el alcance de cada fuente. Segundo, se extrajeron los datos cuantitativos con sus condiciones de ensayo y las conclusiones de las revisiones. Tercero, se elaboró una matriz de evidencias por familia y criterio, utilizada para construir las Tablas 1 y 2. Cuarto, se sintetizaron juicios cualitativos en la Tabla 3, distinguiendo expresamente los datos publicados de las categorías interpretativas asignadas por los autores; cuando no hubo evidencia suficiente, se indicó esa limitación. La clasificación no constituye una escala validada ni una puntuación estadística.

El análisis siguió cuatro pasos. Primero, se leyó cada fuente completa y se registró el material o el tema que trataba. Segundo, se extrajeron los datos y las afirmaciones asociados a las cuatro categorías de análisis. Tercero, se construyó una matriz que cruzaba las familias de electrolitos con esas categorías, a partir de la cual se elaboraron la Tabla 1 y la Tabla 2. Cuarto, se redactó una valoración cualitativa por familia (Tabla 3) que clasifica cada criterio en niveles generales (alto, intermedio, bajo) únicamente cuando las fuentes aportan evidencia para hacerlo; cuando no la

aportan, se indica que no hay datos. Esta valoración es una lectura de los autores y no una puntuación cuantitativa.

3. Resultados

Los resultados se presentan por familia de material y se resumen en la Tabla 1; la Figura 1 compara valores ilustrativos de conductividad en una unidad común, indicando la temperatura de medición. En conjunto, los sulfuros destacan por su conductividad, los óxidos y algunos halogenuros por su estabilidad en condiciones específicas, y los polímeros por su procesabilidad. A continuación se describen los hallazgos de cada familia, los problemas de interfaz y ánodo y los aspectos de desempeño en celda y manufactura.

Los resultados se presentan por familia de material y se resumen en la Tabla 1; la Figura 1 compara los órdenes de magnitud de conductividad reportados. En conjunto, los sulfuros destacan por su conductividad, los óxidos y los halogenuros por su estabilidad, y los polímeros por su procesabilidad. A continuación se describen los hallazgos de cada familia, los problemas de interfaz y ánodo y los aspectos de desempeño en celda y manufactura.

Tabla 1

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas. Unidad común: mS/cm; la conversión utilizada es 1 S/cm = 1000 mS/cm, por lo que 3×10^{-4} *S/cm = 0,3 mS/cm y* 10^{-4} *S/cm = 0,1 mS/cm. Se mantienen valores aproximados de las fuentes; el PEO está representado a 60 °C y no a temperatura ambiente. Las mediciones no son estrictamente comparables entre configuraciones.*

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1695-1714, ISSN: 3103 – 1315

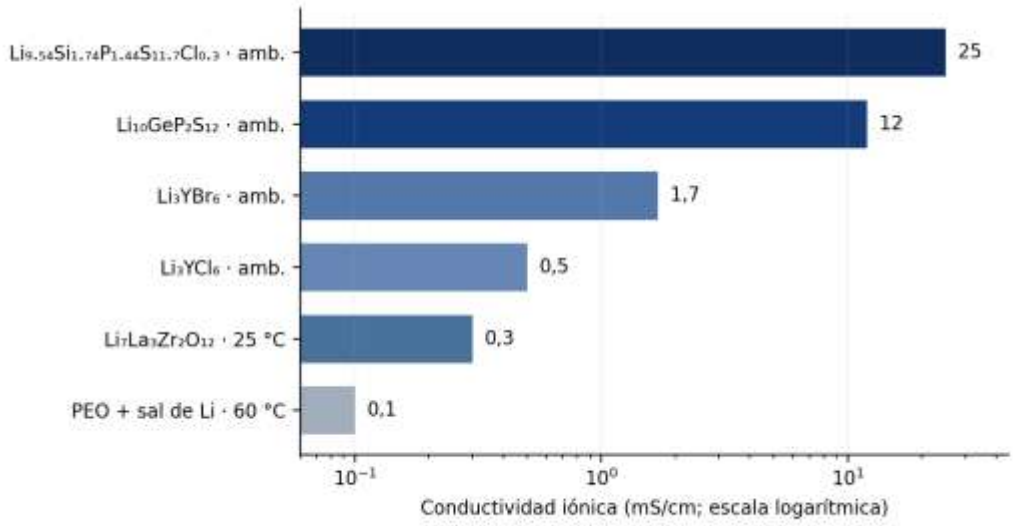
Familia	Ejemplo	Conductividad iónica (mS/cm; temperatura indicada)	Ventajas	Limitaciones	Fuentes
Sulfuros	$Li_{10}GeP_2S_{12}$; $Li_{9.54}Si_{1.74}P_{1.44}S_{11.7}Cl_{0.3}$; Li_6PS_5X	12–25 (temperatura ambiente)	Conductividad muy alta; partículas blandas	Estabilidad limitada frente a los electrodos; descomposición en las interfases	(Bachman et al., 2016; Banerjee et al., 2020; Deiseroth et al., 2008; Kamaya et al., 2011; Kato et al., 2016)
Óxidos (granate)	$Li_7La_3Zr_2O_{12}$	≈0,3 (25 °C)	Robustez química; estabilidad reportada frente al litio	Rigidez; alta resistencia interfacial; sinterización a alta temperatura	(Banerjee et al., 2020; Murugan et al., 2007)
Halogenuros	Li_3YCl_6; Li_3YBr_6	≈0,5–1,7 (temperatura ambiente)	Deformables; estables frente a cátodos de 4 V	Estabilidad limitada frente al litio metálico	(Asano et al., 2018; Janek y Zeier, 2023)
Polímeros	Óxido de polietileno (PEO) con sal de litio	≈0,1 (60 °C; dato orientativo; no ambiente)	Flexibilidad; buena procesabilidad	Cristalinidad; requieren temperatura elevada	(Xue et al., 2015)

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas. Los valores corresponden a los reportes originales y no son estrictamente comparables entre sí.

Conductividad iónica reportada para electrolitos sólidos representativos (temperatura indicada en cada caso)

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1695-1714, ISSN: 3103 – 1315

Conductividad iónica a temperatura ambiente reportada para electrolitos sólidos representativos



Nota. Elaboración propia a partir de Asano et al. (2018), Kamaya et al. (2011), Kato et al. (2016), Murugan et al. (2007) y Xue et al. (2015). Unidad común: mS/cm (1 S/cm = 1000 mS/cm); escala logarítmica. Los valores de sulfuros, halogenuros y granate corresponden a mediciones cercanas a temperatura ambiente; el dato orientativo de PEO corresponde a 60 °C y no debe compararse como si fuera a temperatura ambiente. Los valores proceden de muestras y ensayos distintos.

Nota. Elaboración propia con los valores de (Asano et al., 2018; Kamaya et al., 2011; Kato et al., 2016; Murugan et al., 2007; Xue et al., 2015). Escala logarítmica. El valor del PEO es solo un orden de magnitud y corresponde a 60 °C.

Electrolitos sulfurados

Los sulfuros son la familia con mayor conductividad reportada. Kamaya et al. (2011) describieron el compuesto $Li_{10}GeP_2S_{12}$ con una conductividad de 12 mS/cm a temperatura ambiente, y Kato et al. (2016) alcanzaron 25 mS/cm con la fase $Li_{9.54}Si_{1.74}P_{1.44}S_{11.7}Cl_{0.3}$, lo que permitió construir baterías de estado sólido de alta potencia. Además, las argiroditas Li_6PS_5X (X = Cl, Br, I) forman una clase de sólidos ricos en litio con movilidad iónica inusualmente alta (Deiseroth et al., 2008), con una composición que evita el germanio del compuesto anterior.

Como contrapartida, las revisiones de referencia coinciden en que los sulfuros presentan una estabilidad electroquímica limitada y tienden a descomponerse en las interfaces con los electrodos (Bachman et al., 2016; Banerjee et al., 2020).

Electrolitos de óxido

En los óxidos destaca el granate $Li_7La_3Zr_2O_{12}$, para el cual Murugan et al. (2007) reportaron una conductividad total cercana a 3×10^{-4} S/cm a 25 °C, inferior a la de los sulfuros pero acompañada de una buena estabilidad química. Su rigidez, sin embargo, dificulta el contacto con los electrodos, y las revisiones sobre interfaces identifican la resistencia de contacto como uno de los principales problemas de los electrolitos inorgánicos (Banerjee et al., 2020).

Electrolitos de halogenuro

Los halogenuros de litio son una familia más reciente. Asano et al. (2018) reportaron Li_3YCl_6 y Li_3YBr_6 con conductividades de aproximadamente 0,5 y hasta 1,7 mS/cm, respectivamente, alta deformabilidad y buena estabilidad química y electroquímica. Una celda con Li_3YCl_6 y $LiCoO_2$ sin recubrimiento alcanzó una eficiencia coulómbica inicial de aproximadamente 94 a 95 %, lo que evidencia su compatibilidad con cátodos de clase 4 V. Su estabilidad frente al litio metálico, en cambio, es limitada (Janek y Zeier, 2023).

Electrolitos poliméricos

Los electrolitos poliméricos basados en óxido de polietileno (PEO) son flexibles y fáciles de procesar, pero su cristalinidad restringe el transporte iónico y su conductividad a temperatura ambiente es insuficiente para aplicaciones prácticas (Xue et al., 2015). Por ello suelen operar a unos 60 °C o más, con conductividades del orden de 10^{-4} S/cm.

Los electrolitos compuestos e híbridos combinan, por ejemplo, una matriz polimérica con rellenos inorgánicos para buscar un equilibrio entre flexibilidad, transporte iónico y estabilidad. Zhao et al. (2020) describen estas combinaciones como estrategias de diseño, y Xue et al. (2015) revisan modificaciones del PEO orientadas a reducir su cristalinidad. En este artículo no constituyen una quinta familia evaluada: se presentan como estrategias complementarias y transversales a las cuatro familias de referencia, y no se les asignan categorías comparativas en las Tablas 1 y 3 por falta de un conjunto homogéneo de datos.

Los electrolitos compuestos combinan una fase polimérica con rellenos inorgánicos para aprovechar la flexibilidad del polímero y la conductividad o la estabilidad de la fase inorgánica. Zhao et al. (2020) incluyen estas estrategias entre las vías para diseñar electrolitos sólidos que concilien seguridad y alta densidad de energía, y Xue et al. (2015) revisan modificaciones del PEO orientadas a reducir su cristalinidad. En este trabajo se tratan como una dirección de mejora y no como una quinta familia, porque las fuentes revisadas reportan sobre todo los compromisos de cada material por separado.

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1695-1714, ISSN: 3103 – 1315

Principios de diseño

Wang et al. (2015) propusieron principios de diseño para conductores superiónicos de litio a partir de la estructura de la subred aniónica, mientras que Famprikis et al. (2019) y Zhao et al. (2020) explican los fundamentos de la conducción y las estrategias para combinar seguridad y alta densidad de energía. Estos trabajos muestran que la conductividad puede racionalizarse y optimizarse mediante la composición y la estructura cristalina.

Desde el punto de vista del mecanismo, la conducción en un sólido ocurre por el salto de los iones de litio entre posiciones cristalográficas, de modo que depende de la estructura del material, de las barreras energéticas de migración y de la concentración de portadores y defectos (Bachman et al., 2016; Famprikis et al., 2019). Wang et al. (2015) relacionaron la alta conductividad con una subred aniónica de tipo cúbico centrado en el cuerpo, que favorece barreras de migración bajas para el litio. Bachman et al. (2016) señalan además que la naturaleza del anión influye en la movilidad iónica, lo que es coherente con que los sulfuros superen en conductividad a los óxidos en la Tabla 1.

Interfaces y ánodo de litio

Como ejemplo de ingeniería del ánodo, Lee et al. (2020) desarrollaron una celda completa prototipo de tipo bolsa (pouch) de 0,6 Ah, con cátodo de óxido laminar rico en níquel, electrolito sólido sulfurado tipo argirodita y una capa compuesta de plata y carbono (Ag–C) que regula el depósito de litio sin exceso inicial de litio metálico. En esa configuración se reportaron más de 900 Wh/L de densidad de energía volumétrica, eficiencia coulómbica superior al 99,8 % y 1000 ciclos. Estos resultados describen ese prototipo y sus condiciones de fabricación, no el rendimiento universal de cualquier batería con ánodo Ag–C.

La ingeniería del ánodo ofrece una vía de solución: Lee et al. (2020) usaron un ánodo compuesto de plata y carbono y obtuvieron una celda de tipo bolsa con una densidad de energía superior a 900 Wh/L y más de 1000 ciclos de operación.

Interfase cátodo-electrolito y contacto mecánico

En el lado del cátodo el problema es doble. Por un lado, la reactividad química y electroquímica entre el electrolito y el material activo puede formar interfases resistivas (Banerjee et al., 2020). Por otro, el contacto físico entre partículas sólidas debe mantenerse durante la operación, ya que un sólido no fluye para rellenar los huecos como lo hace un líquido. La deformabilidad de sulfuros y halogenuros facilita ese contacto, mientras que la rigidez de los óxidos lo dificulta, como se resumió en la Tabla 1. La celda de Li_3YCl_6 y $LiCoO_2$ sin recubrimiento reportada por Asano et al. (2018) ilustra que la elección del electrolito puede reducir la necesidad de capas protectoras en

cátodos de 4 V, aunque Janek y Zeier (2023) advierten que el desempeño a largo plazo sigue sin resolverse.

Seguridad y estabilidad

La reducción del riesgo de incendio es la ventaja más citada de las baterías de estado sólido, porque se elimina el solvente orgánico inflamable del electrolito (Janek y Zeier, 2016; Zhao et al., 2020). Sin embargo, la seguridad de la celda no se reduce a la ausencia de líquido. Como muestran Han et al. (2019), un electrolito sólido puede permitir la formación de dendritas de litio en su interior si su conductividad electrónica es elevada, y la descomposición de los sulfuros en las interfases (Bachman et al., 2016; Banerjee et al., 2020) añade un aspecto que conviene evaluar con ensayos específicos. En consecuencia, la seguridad debe tratarse como una propiedad del sistema completo, formado por el electrolito, los electrodos y sus interfaces, y no solo del electrolito.

Desempeño en celda y manufactura

Randau et al. (2020) compararon de manera sistemática los datos reportados para baterías de litio de estado sólido e identificaron objetivos de investigación a partir de ecuaciones fundamentales de desempeño, lo que permite contrastar el desempeño publicado con las condiciones que exige una celda competitiva. En el plano industrial, Schnell et al. (2018) evaluaron con expertos las cadenas de proceso de baterías sulfuradas y de óxido, y concluyeron que la fabricación de electrodos compuestos puede adaptarse a los procesos actuales con cierto esfuerzo, mientras que la capa separadora de electrolito sólido y la integración del ánodo de litio metálico requerirán procesos completamente nuevos.

La Tabla 2 sintetiza los desafíos que las fuentes identifican con mayor frecuencia, las estrategias que reportan para abordarlos y los trabajos que las sustentan. Su lectura confirma que los cuellos de botella se distribuyen a lo largo de toda la celda, desde el material hasta el proceso de fabricación, y que ninguna estrategia aislada los resuelve.

Tabla 2

Desafíos principales y estrategias reportadas en las fuentes revisadas

Desafío	Estrategias reportadas	Fuentes
Conductividad iónica	Diseño de la subred aniónica y de la composición; composiciones que evitan el germanio	(Deiseroth et al., 2008; Kato et al., 2016; Wang et al., 2015)

Desafío	Estrategias reportadas	Fuentes
Estabilidad frente a los electrodos	Selección del electrolito según el cátodo (por ejemplo, halogenuros con cátodos de 4 V); control de las interfases	(Asano et al., 2018; Bachman et al., 2016; Banerjee et al., 2020)
Ánodo de litio y dendritas	Control de la conductividad electrónica del electrolito; ánodos modificados, como el compuesto de plata y carbono	(Albertus et al., 2018; Han et al., 2019; Lee et al., 2020)
Contacto mecánico en las interfaces	Uso de materiales deformables; ingeniería de interfaces	(Banerjee et al., 2020; Zhao et al., 2020)
Manufactura a escala	Adaptación de los procesos de electrodos compuestos; procesos nuevos para la capa de electrolito y el ánodo de litio metálico	(Schnell et al., 2018)
Evaluación del desempeño	Comparación sistemática con objetivos de referencia derivados de ecuaciones de desempeño	(Janek y Zeier, 2023; Randau et al., 2020)

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

La conductividad iónica es el criterio en el que las diferencias entre familias son más visibles, siempre que se explicite la temperatura: los sulfuros reportan 12 a 25 mS/cm a temperatura ambiente (Kamaya et al., 2011; Kato et al., 2016), los halogenuros aproximadamente 0,5 a 1,7 mS/cm (Asano et al., 2018) y el granate $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ cerca de 0,3 mS/cm a 25 °C (Murugan et al., 2007). En PEO con sal de litio se cita un valor orientativo del orden de 0,1 mS/cm a 60 °C (Xue et al., 2015), que no representa su desempeño a temperatura ambiente. La comparación ilustra órdenes de magnitud, no una clasificación experimental bajo condiciones equivalentes.

La conductividad iónica es el criterio en el que las diferencias entre familias son más claras. Los sulfuros reportan valores de 12 a 25 mS/cm (Kamaya et al., 2011; Kato et al., 2016), los halogenuros de aproximadamente 0,5 a 1,7 mS/cm (Asano et al., 2018), el granate $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ cerca de 3×10^{-4} S/cm (Murugan et al., 2007) y el PEO del orden de 10^{-4} S/cm a 60 °C (Xue et al., 2015). Esto significa que entre los sulfuros y las otras familias hay varios órdenes de magnitud de diferencia, pero también que los halogenuros ya operan en un intervalo de mS/cm que los hace competitivos en aplicaciones donde no se requiere el máximo valor posible.

En estabilidad, el panorama se invierte parcialmente. Los sulfuros, que lideran en conductividad, son los que presentan mayor tendencia a descomponerse frente a los electrodos (Bachman et al., 2016; Banerjee et al., 2020). Los óxidos tipo granate combinan una conductividad menor con una estabilidad química reportada como buena (Murugan et al., 2007), y los halogenuros ofrecen

estabilidad frente a cátodos de 4 V pero no frente al litio metálico (Asano et al., 2018; Janek y Zeier, 2023). Para los polímeros, las fuentes revisadas se centran en la conductividad y la cristalinidad del PEO, por lo que su estabilidad no se valora en este trabajo.

En el comportamiento interfacial influyen dos propiedades: la deformabilidad del material y su reactividad. Los sulfuros y los halogenuros son deformables, lo que facilita el contacto con las partículas del electrodo, mientras que la rigidez de los óxidos eleva la resistencia interfacial (Banerjee et al., 2020). Los polímeros, por su flexibilidad, también favorecen el contacto, aunque a costa de operar a temperaturas elevadas (Xue et al., 2015). Un punto transversal es que la formación de dendritas no depende solo de la familia, sino de la conductividad electrónica del electrolito (Han et al., 2019), de modo que este criterio debe evaluarse para cada composición concreta.

Por último, en la viabilidad de fabricación las fuentes aportan menos datos comparables entre familias. Schnell et al. (2018) analizaron las cadenas de proceso de celdas con electrolitos sulfurados y de óxido y concluyeron que la capa separadora de electrolito sólido y el ánodo de litio metálico exigen procesos nuevos. En los óxidos, la sinterización a alta temperatura es una limitación adicional (Banerjee et al., 2020), mientras que los polímeros destacan por su buena procesabilidad (Xue et al., 2015). La Tabla 3 reúne esta lectura por criterio.

Tabla 3

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en las Tablas 1 y 2. Las expresiones «muy alta», «moderada», «baja a moderada», «favorable» y «difícil» son interpretaciones cualitativas de los autores, no categorías ni calificaciones numéricas asignadas por las fuentes. Para conductividad se usó como guía el orden de magnitud: «muy alta» para valores ≥10 mS/cm, «moderada» para valores de 0,5 a <10 mS/cm y «baja a moderada» para valores próximos a 0,1–0,5 mS/cm. La clasificación del PEO como «baja a temperatura ambiente» procede de la síntesis de Xue et al. (2015), no del valor medido a 60 °C. Estabilidad, contacto y procesabilidad se juzgaron por descripciones específicas documentadas (reactividad, deformabilidad, sinterización y necesidades de proceso). Las afirmaciones sobre materiales y condiciones proceden de las publicaciones; la comparación entre categorías es elaboración de los autores. «Sin datos suficientes» no significa desempeño nulo.

Familia	Conductividad	Estabilidad frente a los electrodos	Contacto interfacial	Procesabilidad
Sulfuros	Muy alta (12–25 mS/cm; ambiente)	Limitada	Favorable (deformables)	Requiere procesos nuevos para la capa de electrolito

Familia	Conductividad	Estabilidad frente a los electrodos	Contacto interfacial	Procesabilidad
Óxidos (granate)	Baja a moderada (≈0,3 mS/cm; 25 °C)	Buena estabilidad química reportada	Desfavorable (rígidos)	Difícil (sinterización a alta temperatura)
Halogenuros	Moderada (≈0,5–1,7 mS/cm; ambiente)	Buena frente a cátodos de 4 V; limitada frente al litio	Favorable (deformables)	Sin datos suficientes en las fuentes
Polímeros (PEO)	Baja a temperatura ambiente (el valor ≈0,1 mS/cm es a 60 °C)	No valorada en este trabajo	Favorable (flexibles)	Buena; requiere calor para operar

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la Tabla 1. Es una valoración cualitativa y no una puntuación; las celdas sin evidencia en las fuentes se señalan como tales.

Cadena de proceso de fabricación

Desde la ingeniería industrial, una celda de estado sólido puede describirse como una secuencia de etapas: preparación de los materiales, fabricación del electrodo compuesto, formación de la capa de electrolito sólido, integración del ánodo y ensamblaje de la celda. Schnell et al. (2018) evaluaron con expertos cuáles de estas etapas pueden apoyarse en los procesos de la celda de ion litio actual y cuáles no: la fabricación de electrodos compuestos puede adaptarse con cierto esfuerzo, mientras que la capa separadora de electrolito sólido y la integración del ánodo de litio metálico requerirán procesos completamente nuevos.

Esta distinción tiene consecuencias para la gestión de la producción. Las etapas que se adaptan permiten reutilizar parte de los equipos y del conocimiento de proceso existentes, mientras que las etapas nuevas implican inversión, curva de aprendizaje y definición de nuevos criterios de calidad. Como lectura de los autores, y sin que las fuentes lo cuantifiquen, los puntos de control más sensibles serían la uniformidad y el espesor de la capa de electrolito y la calidad del contacto entre capas, porque de ellos dependen la resistencia interfacial y la repetibilidad del desempeño entre celdas (Banerjee et al., 2020; Randau et al., 2020).

Rutas para el ánodo de litio metálico

Lee et al. (2020) abordaron el problema con un ánodo compuesto de plata y carbono en lugar de modificar únicamente el electrolito. Su prueba correspondió a una celda completa tipo bolsa de 0,6 Ah con cátodo laminar rico en níquel y electrolito sulfurado tipo argirodita; el resultado de más de 900 Wh/L y 1000 ciclos corresponde a ese prototipo específico. La capa Ag–C favoreció un depósito más controlado del litio, y el prensado isostático en caliente mejoró el contacto entre electrodos y electrolito. En conjunto, Albertus et al. (2018), Han et al. (2019) y Lee et al. (2020) muestran rutas complementarias —material del electrolito, diseño del ánodo y control de la interfaz— sin que los resultados de una sola arquitectura puedan generalizarse a todas las celdas.

Frente a ese problema, Lee et al. (2020) siguieron una estrategia distinta, que consiste en modificar el ánodo con un compuesto de plata y carbono y no en cambiar solo el electrolito. Con esa estrategia reportaron una celda de tipo bolsa con una densidad de energía superior a 900 Wh/L y más de 1000 ciclos. En conjunto, estas tres fuentes sugieren que el problema del ánodo puede abordarse desde el electrolito, desde el propio electrodo o desde la interfaz entre ambos, y que las soluciones no son excluyentes.

Conductividad, potencia y desempeño en celda

Una conductividad alta es condición necesaria, pero no suficiente, para un buen desempeño en celda. Kato et al. (2016) mostraron que un electrolito sulfurado muy conductor permitió construir baterías de estado sólido de alta potencia, lo que confirma el valor de este parámetro. No obstante, Janek y Zeier (2023) señalan que, aun con electrolitos más conductores que los líquidos, persisten problemas de potencia específica y de desempeño a largo plazo, lo que indica que otros factores, como las interfaces y la microestructura de los electrodos, limitan la celda completa.

Este hallazgo se relaciona con el trabajo de Randau et al. (2020), quienes propusieron comparar los datos publicados con los requisitos de una celda competitiva. Su aporte metodológico es relevante para este estudio porque recuerda que los valores de conductividad del material deben leerse junto con el resto de parámetros de la celda. Por ello, la Tabla 1 y la Figura 1 deben interpretarse como una descripción de los materiales y no como una predicción del desempeño de una batería terminada.

4. Discusión

Los resultados indican que la conductividad volumétrica dejó de ser el principal obstáculo. Los sulfuros ya alcanzan valores de decenas de mS/cm (Kamaya et al., 2011; Kato et al., 2016), y la discusión actual se concentra en el desempeño a largo plazo, la potencia específica y la viabilidad económica (Janek y Zeier, 2023). Esto matiza la expectativa inicial de que bastaba con encontrar

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1695-1714, ISSN: 3103 – 1315

un sólido más conductor que el líquido: en una celda real, la ventaja de un material puede perderse en la interfaz o en el proceso de fabricación.

La comparación entre familias revela un compromiso entre conductividad, estabilidad y procesabilidad. Los sulfuros son los más conductores y deformables, pero los menos estables; los óxidos son robustos, aunque rígidos y menos conductores; los halogenuros mejoran la compatibilidad con cátodos de alto voltaje, pero reaccionan con el litio; y los polímeros se procesan con facilidad, pero requieren calor. Como ninguna familia domina en todos los criterios, las estrategias híbridas y el diseño de interfaces resultan atractivos, en línea con lo señalado por Zhao et al. (2020) y Banerjee et al. (2020).

El hallazgo de Han et al. (2019) es especialmente relevante: demuestra que la seguridad frente a dendritas no es una propiedad automática del estado sólido, sino que depende de propiedades electrónicas y microestructurales del electrolito. Junto con el resultado de Lee et al. (2020), que logra una alta densidad de energía con un ánodo modificado, sugiere que la ingeniería de interfaces y de ánodos puede ser tan decisiva como el descubrimiento de nuevos electrolitos. A su vez, la existencia de objetivos de referencia (Randau et al., 2020) ayuda a evaluar si los avances de laboratorio se acercan a las condiciones de una celda competitiva.

Respecto a la madurez de la tecnología, las fuentes muestran una brecha entre el desempeño de laboratorio y los requisitos de una celda competitiva. Randau et al. (2020) proponen contrastar los datos publicados con objetivos derivados de ecuaciones de desempeño, y Janek y Zeier (2023) subrayan que persisten problemas de desempeño a largo plazo, de potencia específica y de viabilidad económica cerca de una década después de los primeros electrolitos sólidos más conductores que los líquidos. Por ello, los resultados obtenidos en celdas de laboratorio, como la celda de tipo bolsa de Lee et al. (2020), deben interpretarse con cautela como evidencia de viabilidad y no como prueba de que la tecnología esté lista para su producción masiva.

Desde la ingeniería industrial, el aporte de Schnell et al. (2018) es clave, porque desplaza la discusión del material hacia la cadena de proceso. Si la fabricación de electrodos puede adaptarse, pero la capa de electrolito y el ánodo de litio metálico requieren procesos nuevos, la inversión en equipos, el control de calidad y el costo se vuelven variables tan importantes como la conductividad. Una hipótesis razonable es que los materiales más reactivos obliguen a controlar la atmósfera de producción, lo que encarecería el proceso; esta implicación no proviene directamente de las fuentes revisadas y debe verificarse con análisis técnico-económicos específicos.

A partir de lo anterior, se propone, como lectura de los autores y no como hallazgo de las fuentes, que la evaluación industrial de una familia de electrolitos considere al menos cuatro dimensiones: (a) la compatibilidad de sus pasos de fabricación con los procesos existentes de electrodos compuestos (Schnell et al., 2018); (b) los requisitos de control de calidad de la capa de electrolito,

cuyo espesor y uniformidad inciden en el desempeño de la celda (Randau et al., 2020); (c) el costo y la disponibilidad de los materiales, por ejemplo la composición libre de germanio de las argiroditas (Deiseroth et al., 2008); y (d) la estabilidad de los materiales durante su manejo y almacenamiento. Estas dimensiones permitirían ordenar las familias de la Tabla 1 en un análisis multicriterio, cuya ponderación debería establecerse con datos técnico-económicos.

En cuanto a las aplicaciones, las baterías de ion litio ya abarcan desde la electrónica portátil hasta la movilidad eléctrica (Tarascon y Armand, 2001), y las baterías de estado sólido se plantean como una evolución de esa tecnología. Su atractivo principal es la posibilidad de emplear litio metálico como ánodo para alcanzar mayores densidades de energía (Albertus et al., 2018) y de abrir químicas que los electrolitos líquidos no permiten (Manthiram et al., 2017). Sin embargo, las fuentes más recientes indican que el camino hacia el producto comercial sigue abierto (Janek y Zeier, 2023), por lo que conviene hablar de escenarios de uso potenciales y no de aplicaciones consolidadas.

Este trabajo se distingue de las revisiones consultadas por su carácter integrador. Bachman et al. (2016) y Famprikis et al. (2019) se concentran en los mecanismos y las propiedades de los conductores inorgánicos; Banerjee et al. (2020) en las interfaces y las interfases; Randau et al. (2020) en la comparación del desempeño reportado; y Schnell et al. (2018) en la manufactura. Al ponerlas bajo cuatro criterios comunes, se hace visible que los mismos materiales aparecen con ventajas o con limitaciones según el criterio que se mire, lo que respalda la idea de que la elección de un electrolito requiere una lectura conjunta del material, la celda y el proceso.

Una implicación adicional, formulada como hipótesis de los autores, es que los programas de formación en ingeniería industrial podrían incorporar contenidos sobre manufactura de baterías, control estadístico de procesos aplicado a capas delgadas y análisis técnico-económico de cadenas de suministro de materiales para el almacenamiento de energía. Esta propuesta no se deriva directamente de las fuentes revisadas y requeriría validarse con un estudio específico de las necesidades de la industria.

Conviene señalar también un posible sesgo en los datos. Los trabajos originales suelen reportar los mejores valores obtenidos para un material en condiciones controladas de laboratorio, y las revisiones los recogen como referencia. Esto puede dar una imagen más favorable que la que se obtendría con materiales producidos a escala, con impurezas, con variaciones de composición o con otros procesos de densificación. Por esa razón, las cifras de la Tabla 1 se interpretan como límites superiores de lo reportado y no como valores esperables en producción, una lectura que debería contrastarse con datos de planta piloto cuando estén disponibles.

Este estudio tiene limitaciones. La selección de 20 fuentes fue intencional y no exhaustiva, los valores provienen de laboratorios y configuraciones distintas, y no se realizó metaanálisis. Futuras

investigaciones podrían aplicar un protocolo de revisión sistemática con criterios de búsqueda explícitos y complementarlo con análisis de costos y de ciclo de vida.

5. Conclusiones

Respecto a la pregunta planteada, los compromisos más importantes son la alta conductividad frente a la baja estabilidad en los sulfuros, la robustez frente a la rigidez en los óxidos, la compatibilidad con cátodos de alto voltaje frente a la reactividad con el litio en los halogenuros, y la procesabilidad frente a la necesidad de calor en los polímeros. El aporte de este trabajo es un marco comparativo que evalúa los electrolitos sólidos con cuatro criterios simultáneos: conductividad, estabilidad, comportamiento interfacial y viabilidad de fabricación. Aplicado a las fuentes revisadas, el marco muestra que la elección de un electrolito no puede hacerse de forma aislada, sino junto con la arquitectura de la celda y el proceso productivo.

Para la ingeniería industrial, la prioridad de investigación y de desarrollo debería ser la evaluación de cadenas de proceso, el control de calidad y el costo de manufactura, además de la mejora de los materiales. Resultan prometedoras las líneas de electrolitos híbridos, de ingeniería de interfaces y de ánodos protegidos, así como estudios técnico-económicos que permitan decidir con datos entre las alternativas disponibles.

Como líneas de trabajo futuro se identifican: (i) ampliar la revisión con un protocolo sistemático y con fuentes posteriores a 2023; (ii) incorporar datos de estabilidad y de desempeño en celda obtenidos en condiciones comparables, de modo que los valores de las distintas familias puedan contrastarse cuantitativamente; (iii) desarrollar modelos técnico-económicos de la cadena de proceso que incluyan costo, rendimiento y control de calidad; y (iv) explorar los electrolitos compuestos y las interfaces diseñadas como vía para combinar las ventajas de varias familias.

En síntesis, los resultados no permiten señalar un electrolito ganador. Permiten, en cambio, orientar la elección: los sulfuros cuando se prioriza la conductividad y se puede gestionar la inestabilidad en las interfases; los óxidos cuando prima la robustez química y es aceptable un proceso de sinterización exigente; los halogenuros cuando se busca compatibilidad con cátodos de alto voltaje; y los polímeros cuando importa la procesabilidad y se puede operar a temperatura elevada. Esta guía es provisional y se limita a las fuentes revisadas.

En conjunto, el artículo aporta tres elementos: una comparación de las cuatro familias de electrolitos con criterios comunes (Tablas 1 y 3), una síntesis de los desafíos y las estrategias reportadas (Tabla 2) y una lectura de la cadena de proceso desde la ingeniería industrial. Estos elementos pueden servir como punto de partida para estudios posteriores con un diseño más sistemático y con datos de costo y de manufactura.

Referencias

Albertus, P., Babinec, S., Litzelman, S., y Newman, A. (2018). Status and challenges in enabling the lithium metal electrode for high-energy and low-cost rechargeable batteries. *Nature Energy*, *3*(1), 16–21. https://doi.org/10.1038/s41560-017-0047-2

Asano, T., Sakai, A., Ouchi, S., Sakaida, M., Miyazaki, A., y Hasegawa, S. (2018). Solid halide electrolytes with high lithium-ion conductivity for application in 4 V class bulk-type all-solid-state batteries. *Advanced Materials*, *30*(44), 1803075. https://doi.org/10.1002/adma.201803075

Bachman, J. C., Muy, S., Grimaud, A., Chang, H.-H., Pour, N., Lux, S. F., Paschos, O., Maglia, F., Lupart, S., Lamp, P., Giordano, L., y Shao-Horn, Y. (2016). Inorganic solid-state electrolytes for lithium batteries: Mechanisms and properties governing ion conduction. *Chemical Reviews*, *116*(1), 140–162. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00563

Banerjee, A., Wang, X., Fang, C., Wu, E. A., y Meng, Y. S. (2020). Interfaces and interphases in all-solid-state batteries with inorganic solid electrolytes. *Chemical Reviews*, *120*(14), 6878–6933. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00101

Deiseroth, H.-J., Kong, S.-T., Eckert, H., Vannahme, J., Reiner, C., Zaiß, T., y Schlosser, M. (2008). Li6PS5X: A class of crystalline Li-rich solids with an unusually high Li+ mobility. *Angewandte Chemie International Edition*, *47*(4), 755–758. https://doi.org/10.1002/anie.200703900

Famprikis, T., Canepa, P., Dawson, J. A., Islam, M. S., y Masquelier, C. (2019). Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes for batteries. *Nature Materials*, *18*(12), 1278–1291. https://doi.org/10.1038/s41563-019-0431-3

Han, F., Westover, A. S., Yue, J., Fan, X., Wang, F., Chi, M., Leonard, D. N., Dudney, N. J., Wang, H., y Wang, C. (2019). High electronic conductivity as the origin of lithium dendrite formation within solid electrolytes. *Nature Energy*, *4*(3), 187–196. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0312-z

Janek, J., y Zeier, W. G. (2016). A solid future for battery development. *Nature Energy*, *1*(9), 16141. https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.141

Janek, J., y Zeier, W. G. (2023). Challenges in speeding up solid-state battery development. *Nature Energy*, *8*(3), 230–240. https://doi.org/10.1038/s41560-023-01208-9

Kamaya, N., Homma, K., Yamakawa, Y., Hirayama, M., Kanno, R., Yonemura, M., Kamiyama, T., Kato, Y., Hama, S., Kawamoto, K., y Mitsui, A. (2011). A lithium superionic conductor. *Nature Materials*, *10*(9), 682–686. https://doi.org/10.1038/nmat3066

Kato, Y., Hori, S., Saito, T., Suzuki, K., Hirayama, M., Mitsui, A., Yonemura, M., Iba, H., y Kanno, R. (2016). High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors. *Nature Energy*, *1*(4), 16030. https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.30

Lee, Y.-G., Fujiki, S., Jung, C., Suzuki, N., Yashiro, N., Omoda, R., Ko, D.-S., Shiratsuchi, T., Sugimoto, T., Ryu, S., Ku, J. H., Watanabe, T., Park, Y., Aihara, Y., Im, D., y Han, I. T. (2020). High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver–carbon composite anodes. *Nature Energy*, *5*(4), 299–308. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0575-z

Manthiram, A., Yu, X., y Wang, S. (2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, *2*(4), 16103. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.103

Murugan, R., Thangadurai, V., y Weppner, W. (2007). Fast lithium ion conduction in garnet-type Li7La3Zr2O12. *Angewandte Chemie International Edition*, *46*(41), 7778–7781. https://doi.org/10.1002/anie.200701144

Randau, S., Weber, D. A., Kötz, O., Koerver, R., Braun, P., Weber, A., Ivers-Tiffée, E., Adermann, T., Kulisch, J., Zeier, W. G., Richter, F. H., y Janek, J. (2020). Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries. *Nature Energy*, *5*(3), 259–270. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0565-1

Schnell, J., Günther, T., Knoche, T., Vieider, C., Köhler, L., Just, A., Keller, M., Passerini, S., y Reinhart, G. (2018). All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production. *Journal of Power Sources*, *382*, 160–175. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.062

Tarascon, J.-M., y Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, *414*(6861), 359–367. https://doi.org/10.1038/35104644

Wang, Y., Richards, W. D., Ong, S. P., Miara, L. J., Kim, J. C., Mo, Y., y Ceder, G. (2015). Design principles for solid-state lithium superionic conductors. *Nature Materials*, *14*(10), 1026–1031. https://doi.org/10.1038/nmat4369

Xue, Z., He, D., y Xie, X. (2015). Poly(ethylene oxide)-based electrolytes for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, *3*(38), 19218–19253. https://doi.org/10.1039/C5TA03471J

Zhao, Q., Stalin, S., Zhao, C.-Z., y Archer, L. A. (2020). Designing solid-state electrolytes for safe, energy-dense batteries. *Nature Reviews Materials*, *5*(3), 229–252. https://doi.org/10.1038/s41578-019-0165-5