

Baterías para una movilidad sostenible: avances, retos y perspectiva

Batteries for sustainable mobility: progress, challenges and outlook

Javier Carretero-González¹, Miguel Ángel López-Manchado¹, Cinthia Alegre², María Jesús Lázaro², Alodia Orera³, Olga Rodríguez⁴, Lorena Alcaraz⁴

¹Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, ICTP, CSIC, C/ Juan de la Cierva 3, Madrid

²Instituto de Carboquímica, ICB, CSIC, C/ Miguel Luesma Castán, 4, Zaragoza

³Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, INMA, CSIC-Universidad de Zaragoza, C/ María de Luna 3, 50018 Zaragoza

⁴Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM, CSIC, Avda. Gregorio del Amo, 8, Madrid

*Corresponding author: jcarretero@ictp.csic.es



Abstract

The application of batteries coupled to renewable energy conversion systems in cities will greatly help to overcome some of the technological challenges for grid electrification and transport, such as difficult accessibility to charging points, and cost, by improving their technical capabilities and making the energy system globally more sustainable. Furthermore, its implementation will have an immediate effect on citizens' health due to the reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere, as well as other pollutants. Below is a review of recent efforts to develop new advanced technologies for future sustainable batteries. We will also highlight current battery recycling strategies that are being implemented towards a zero-carbon future based on the concept of the circular economy.

Resumen

La aplicación de baterías acopladas a sistemas de conversión de energía renovable en las ciudades ayudará en gran medida a superar algunos de los retos tecnológicos para la electrificación de la red y el transporte, como la difícil accesibilidad a puntos de carga, y de coste, mejorando sus capacidades técnicas y haciendo que el sistema energético a nivel global sea más sostenible. Además, su aplicación tendrá un efecto inmediato en la salud de los ciudadanos debido a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, así como otros contaminantes. A continuación, presentamos una revisión de los esfuerzos recientes para desarrollar nuevas tecnologías avanzadas para las futuras baterías sostenibles. También destacaremos las estrategias actuales de reciclado de baterías que se aplican hacia un futuro con cero emisiones de carbono y basado en el concepto de economía circular.

1. Introducción

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de agentes contaminantes nocivos a la atmósfera debería ser una medida prioritaria para mitigar el cambio climático y las enfermedades conexas. Por esta razón es necesario aplicar a nivel mundial métodos más eficaces, seguros y ecológicos

de generación y almacenamiento de electricidad. Entre los dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica, las baterías destacan por su versatilidad. Sin embargo, la transición de los combustibles fósiles a las tecnologías de baja emisión de carbono provocará un aumento de la demanda de baterías y, por consiguiente, del consumo de sus materias primas. Así, la producción de litio, cobalto y vanadio de 2017 debería incrementarse en un 965%, 585% y 173%, respectivamente, para 2050 [1]. Por lo tanto, la sustitución de algunos de estos materiales actualmente utilizados en los dispositivos y la búsqueda de alternativas debe ser una prioridad en los próximos años.

En este artículo, se revisarán las tecnologías de baterías sostenibles adecuadas para aplicaciones tanto en la red eléctrica como en sistemas de movilidad dentro de la ciudad, manteniendo el enfoque principalmente en las mejoras y los últimos progresos relacionados con los materiales activos y las diferentes estrategias utilizadas por los investigadores para su desarrollo. También se examinarán otros aspectos relacionados con la sostenibilidad de las baterías, incluidos el reciclado y la reutilización de algunos de sus componentes.

Las baterías secundarias son uno de los sistemas de almacenamiento de energía más versátiles. Debido a la existencia de una amplia variedad en la química en los componentes de las baterías, estos sistemas electroquímicos pueden almacenar reversiblemente una enorme cantidad de energía (~200 Wh/Kg) eligiendo la combinación adecuada entre sus componentes principales, como son los electrodos (cátodo y ánodo) y el electrolito, y la configuración de la celda. En los sistemas destinados a un uso tanto doméstico como a gran escala, la seguridad y el coste deben considerarse prioritarios junto con esos parámetros técnicos. Los principales tipos de baterías que se utilizan actualmente para el almacenamiento doméstico y a gran escala de electricidad son las baterías de plomo-ácido, las de iones de litio y, en menor medida, las de flujo redox basadas en vanadio. Las baterías de ión litio exhiben valores de densidad de energía volumétrica y gravimétrica más altos (70-200 Wh/Kg y 200-500 Wh/L) que las de plomo (30-40 Wh/Kg y 60-100 Wh/L). Sin embargo, la tecnología actual de las baterías de iones de litio de alta densidad energética

es cara e insostenible debido a la presencia de metales escasos y costosos en la composición de los electrodos, como son el litio, el cobalto y el níquel. Además, las actuales baterías de ión litio presentan un alto riesgo de formación de compuestos tóxicos en caso de explosión de la batería [2]. La batería de plomo-ácido tiene una capacidad de carga bastante limitada, una duración de ciclo relativamente corta (500-2000 ciclos) y un rendimiento deficiente a altas temperaturas, lo que hace que esta tecnología no sea adecuada para aplicaciones de almacenamiento de energía estacionaria. Las baterías de flujo de redox (BFR) más desarrolladas y extendidas están basadas en vanadio o en zinc-bromo. Estas baterías contienen sustancias químicas altamente corrosivas y los materiales electroactivos son caros, escasos y tóxicos.

2. Materiales carbonosos aplicados en baterías

Las estructuras a base de carbono son uno de los materiales más versátiles utilizados actualmente en el campo de las energías renovables, tanto en generación como en almacenamiento [3]. Sus ventajas radican en la gran abundancia de estos compuestos, junto con sus excelentes propiedades tanto como material soporte del catalizador como de catalizador en sí mismo, los hace idóneos en multitud de reacciones electroquímicas como la reducción y la evolución de oxígeno, la evolución de hidrógeno, o incluso la reducción del CO_2 [4], reacciones fundamentales en distintos dispositivos electroquímicos como las pilas de combustible, las baterías metal-aire, o los electrolizadores.

También existe un interés creciente en el desarrollo de materiales de carbón avanzado a partir de precursores naturales, abundantes y más renovables (como la celulosa, biomasa, taninos, etc), junto a procedimientos sintéticos más sostenibles, con menor coste energético y evitando el uso de compuestos tóxicos, es decir, atendiendo a todo el conjunto del ciclo de vida, desde el precursor de carbono pasando por la fabricación, hasta el final de la vida útil del producto.

Las baterías de metal-aire (BMA) están recibiendo cada vez más interés por parte de la comunidad científica. Estas baterías combinan características de las baterías convencionales y de las pilas de combustible y resultan de enorme interés en los sectores de la automoción y la generación distribuida de electricidad por su menor coste, gracias a la posibilidad de emplear materiales abundantes. Las BMA presentan una elevada energía específica (entre 1.000 y 11.000 Wh/kg, en función del metal utilizado, frente a los 200 Wh/kg aprox. de las baterías de ion litio), y presentan un menor impacto medioambiental. Las BMA, como se observa en la Figura 1, están formadas por un electrodo negativo constituido por un metal (Zn, Mg, Al, Fe o Li) que se oxida y se reduce, y un soporte catódico o electrodo positivo, donde tiene lugar la reacción de los iones metálicos con el oxígeno del aire (en el caso de baterías que emplean Li) o la reducción del oxígeno (en el caso de baterías que emplean Zn, Fe, etc). El aire, al no estar directamente almacenado en la celda, hace que estas baterías sean mucho más ligeras y presenten una mayor densidad energética que las baterías convencionales [5].

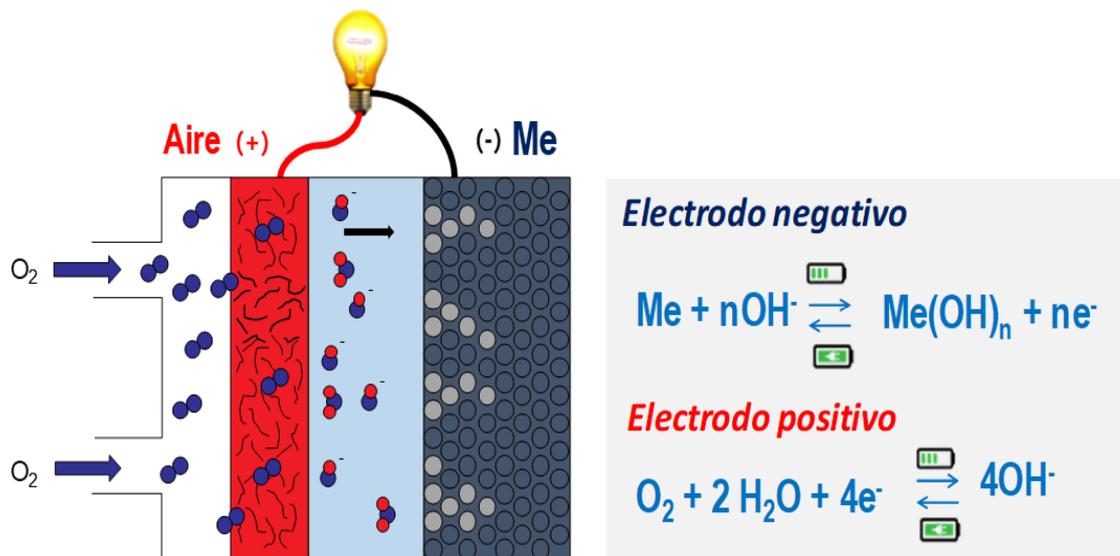


Figura 1. Esquema y reacciones de una batería metal-aire de electrolito acuoso.

Figure 1. Diagram and reactions of an aqueous electrolyte metal-air battery.

Las BMA afrontan todavía a una serie de retos que es necesario resolver para su comercialización. En las BMA el electrolito está en fase líquida, lo que puede acarrear escapes/pérdidas del mismo al aumentar la sobrepresión dentro de la batería, el electrodo negativo presenta una baja eficiencia culómbica debido generalmente a la evolución de hidrógeno,

una reacción parásita que interfiere con la carga de la batería, o a la formación de dendritas, unas estructuras que pasivan la superficie del electrodo. Mientras que el electrodo positivo presenta baja actividad y reversibilidad, siendo necesario la presencia de catalizadores bifuncionales para llevar a cabo las reacciones de evolución (carga) y reducción

(descarga) de oxígeno, lo que conlleva una limitada durabilidad. Las investigaciones más recientes han demostrado que en el electrodo negativo, el empleo de negros de carbono conductores mejora la ciclabilidad [6]. En el electrodo positivo o electrodo de aire, son numerosos los estudios que utilizan distintos tipos de materiales carbonosos (grafeno, nanofibras y nanotubos de carbono, aerogeles, etc), bien sea como soporte de catalizadores o como catalizador libre de metal. Recientemente, se ha demostrado que las nanofibras de carbono dopadas con nitrógeno (N-CNFs) y metales de transición presentan una muy elevada actividad para las reacciones de reducción (ORR, de sus siglas en inglés oxygen reduction reaction) y evolución de oxígeno (OER, de sus siglas en inglés, oxygen evolution reaction), que tienen lugar en una BMA durante la descarga y la carga de la batería, respectivamente (Figure 2).

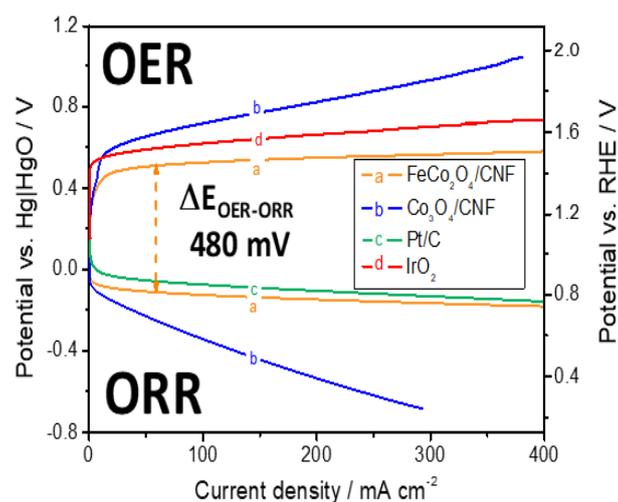
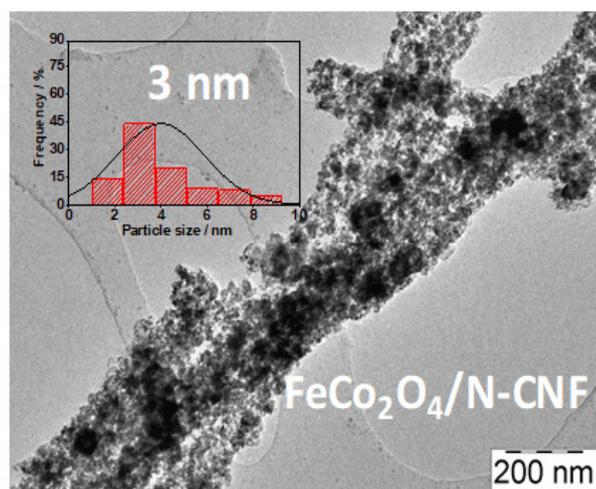


Figura 2. TEM de la espinela FeCo₂O₄ sobre nanofibra de carbono dopada con nitrógeno (izquierda). Reversibilidad para las reacciones de ORR y OER (derecha). Mat. Today Energy, 2020, 18, 100508.

Figure 2. TEM of FeCo₂O₄ spinel on nitrogen-doped carbon nanofibre (left). Reversibility for ORR and OER reactions (right). Today Energy, 2020, 18, 100508.

Otra tipología de baterías con un futuro prometedor, son las baterías metal-azufre (Me-S), que presentan ventajas comunes a las baterías metal-aire, como su bajo coste, su bajo impacto medioambiental, el empleo de materiales económicos y abundantes como el azufre y elevadas densidades de energía tanto gravimétricas (~2600 Wh kg⁻¹) como volumétricas (~2800 Wh L⁻¹). Las baterías Me-S más desarrolladas hasta el momento son las que emplean litio como electrodo negativo (LiSB). Sin embargo, las LiSB aún no han alcanzado la comercialización debido a ciertos problemas como la formación de polisulfuros de litio solubles o la baja conductividad eléctrica y baja densidad de carga del azufre. Estos problemas se deben principalmente a la naturaleza aislante inherente al azufre. Las investigaciones recientes han demostrado que mediante el uso de nanomateriales de carbono como el grafeno, o nanomateriales unidimensionales huecos, e incluso nanoestructuras de carbono tridimensionales como los nanotubos de carbono, se consiguen mayores eficiencias y densidades de energía en los electrodos positivos de este tipo de baterías [7].

3. Electrolitos sólidos

La comercialización de vehículos híbridos, en los que el peso de la batería es crucial, hace patente la necesidad de desarrollar sistemas de almacenamiento de energía más eficaces, de menor tamaño/peso y mayor capacidad, y en este sentido las baterías de Li se presentan como la mejor opción, ya que disponen de densidades de energía mayores que otros sistemas de baterías secundarias antes mencionados. Sin embargo, el aumento en los requerimientos de densidad de energía incrementa los ya conocidos riesgos de seguridad de las baterías tradicionales relacionados con la inflamabilidad de sus electrolitos basados en líquidos orgánicos con moderada estabilidad térmica y electroquímica, así como la presencia de litio metálico en el ánodo. Las baterías de litio de estado sólido (ASSLBs de sus siglas en inglés *all solid state lithium batteries*) minimiza los riesgos de inflamación o explosión, evita los riesgos de fugas facilitando los procesos de sellado de la batería reduciendo el peso de la misma, permite miniaturización de las mismas mediante el procesado en capa delgada de los electrolitos y por último presentan ventanas electroquímicas muy amplias al mismo tiempo que excelente estabilidad mecánica y térmica (Figura 3).

Además de todas estas ventajas generales, la posibilidad de algunos de estos electrolitos sólidos en desarrollo de ser compatibles con el uso de litio metálico en el ánodo y cátodos de alta energía permite alcanzar altas capacidades y densidades de energía. En las baterías convencionales, el electrolito líquido comúnmente usado contiene LiPF₆ disuelto en una mezcla de carbonatos de dimetilo y etileno, entre otras combinaciones de diversas sales de Li (LiBF₄, LiCF₃SO₃, LiN(CF₃SO₂)₂, LiClO₄, etc.) en disolventes orgánicos.

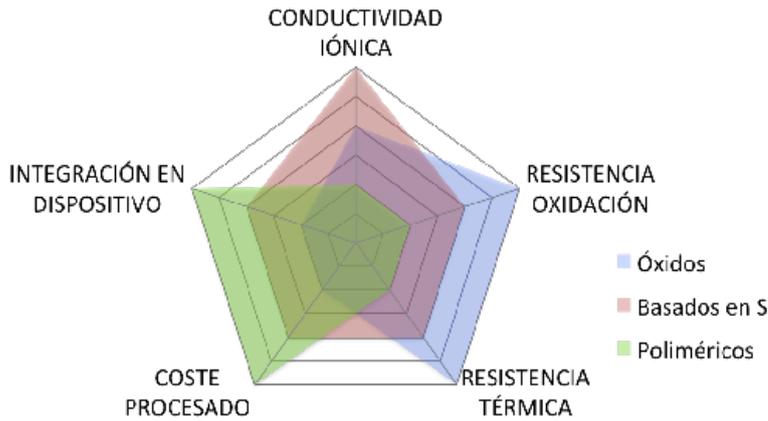


Figura 3. Visión comparativa de las propiedades de los diferentes grupos de materiales usados como electrolitos sólidos en baterías de Litio.
Figure 3. Comparative of the properties of the different groups of materials used as solid electrolytes in Lithium batteries.

Una estrategia para evitar el uso de los disolventes orgánicos que limitan la estabilidad del sistema ha sido incorporar la sal de Li en polímeros, que además no son inflamables. Estos polímeros sin embargo adolecen de relativamente bajas conductividades iónicas a temperatura ambiente. Dicha limitación favoreció el desarrollo de los electrolitos poliméricos híbridos (geles poliméricos), los cuales incorporan disolventes orgánicos a la matriz del polímero. Estos electrolitos son los más utilizados en las baterías de litio comercializadas, pero siguen teniendo problemas de seguridad debido a su carácter semilíquido. Los electrolitos sólidos poliméricos estudiados en la actualidad se basan principalmente en óxidos de polietileno (PEO), polimetil-metacrilato, poliacrilonitrilo, polifosfacenos y fluoruro de polivinilideno (PVDF) (Figura 4).

El uso de electrolitos sólidos inorgánicos, además de presentar las ventajas relacionadas con la seguridad que presentan los poliméricos, también exhiben amplias ventanas electroquímicas que permiten trabajar a mayores diferencias de potencial entre los electrodos, no muestran problemas de corrosión y tienen ciclos de vida superiores a los de las baterías de electrolito líquido y por eso es la tecnología propuesta para la llamada “generación 4” de baterías de Li, esperada en el mercado para la próxima

década. Entre los sólidos inorgánicos susceptibles de ser utilizados como electrolito en LIBs cabe diferenciar entre los conductores amorfos-vítreos y los sólidos cristalinos. Dentro de los electrolitos no cristalinos se encuentra el LIPON (fosfato de litio nitrurado), con una amplia ventana electroquímica, buena ciclabilidad y estabilidad frente a Li pero con limitada conductividad, lo que condiciona su aplicación a microbaterías. Los sólidos cristalinos por lo general muestran también el problema de la baja conductividad a temperatura ambiente, aunque en los últimos años se han desarrollado materiales prometedores con estructura de tipo LISICON, perovskita, NASICON y granate. Los denominados “conductores superiónicos de litio” (LISICON), de fórmula general $Li_{2+2x}Zn_{1-x}GeO_4$ presentan conductividades muy elevadas a temperaturas intermedias pero muy bajas a RT como por ejemplo los sistemas $Li_{3+x}Ge_xV_{1-x}O_4$ o $Li_{4-x}Si_{1-x}P_xO_4$. La sustitución de los átomos de oxígeno por azufre en compuestos tipo $Li_{10}GeP_2S_{12}$ o $Li_{4-x}Ge_{1-x}P_xS_4$ (LGPS) denominados Thio-LISICON, ha supuesto un gran avance en cuanto a valores de conductividad, siendo estos comparables a los de los electrolitos líquidos de las baterías convencionales, especialmente cuando se presentan en forma amorfa o vitrocerámica.

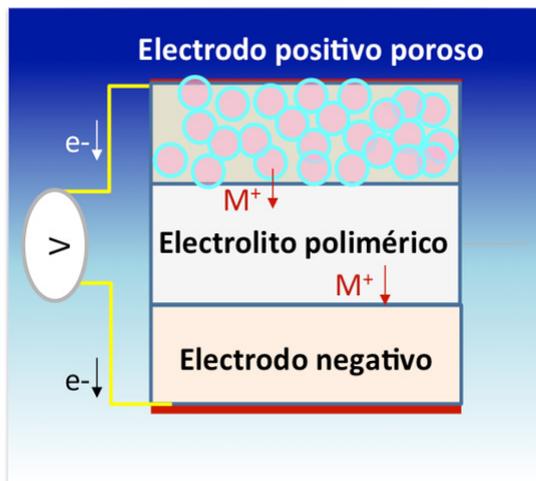


Figura 4. Componentes (electrodo y electrolito) de una batería de metal-polímero de alta densidad de energía (izquierda). Estructura molecular de un electrolito sólido polimérico avanzado para baterías de Li-polímero para vehículos eléctricos (derecha).

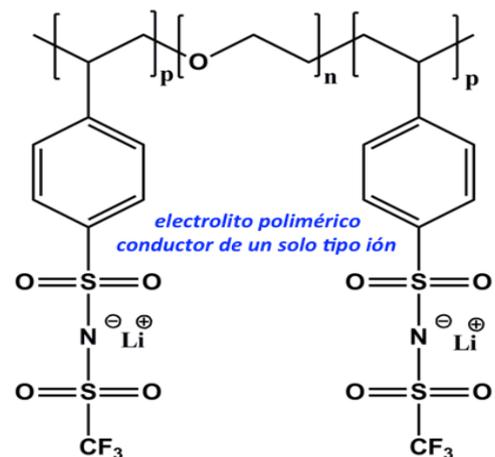


Figure 4. Solid state polymer battery (left). Advanced single-ion polymer electrolyte for all solid-state Li-polymer batteries for electric vehicles.

El mayor inconveniente de estas fases es su alta reactividad con la humedad, formando H_2S . La baja estabilidad frente a la exposición a la atmósfera es también el factor limitante en el desarrollo de electrolitos basados en estructuras tipo Argirodita Li_6PS_5X siendo $X=Cl, Br, I$. Las perovskitas de titanio, litio y lantano de la familia de $Li_{3x}La_{2/3-x}TiO_3$ (LLTO) tienen una conductividad iónica del bulk excelente pero su aplicación se ha visto limitada por la alta resistencia de sus fronteras de grano y la reducción de Ti^{4+} a Ti^{3+} que da lugar a un incremento de la conductividad electrónica. Para evitar este inconveniente se han desarrollado composiciones basadas en Li, Sr, Ta y Zr/Hf mucho más estables. Entre los conductores de litio de la familia NASICON destaca la familia de $LiTi_2(PO_4)_3$, debido a la alta conductividad que presenta especialmente cuando parte del Ti es sustituido por iones trivalentes como el Al, por ejemplo $Li_{1+x}Al_xTi_{2-x}(PO_4)_3$ (LATP). Sin embargo, al igual que en el caso anterior, la posible reducción del Ti^{4+} limita sus voltajes de operación y ha hecho que se dirijan esfuerzos hacia otras composiciones más estables basadas en Zr, Ge, Hf. Los altos valores de conductividad y estabilidad reportados para $Li_{1+x}Al_xGe_{2-x}(PO_4)_3$ (LAGP) en fase cristalina o vitrocerámica lo hacen un excelente candidato para ASSLBs, con la limitación del alto precio del Ge [8]. Respecto a los granates de Li, especialmente los basados en iones muy estables frente a la reducción como Zr o Ta, la posibilidad de usar litio metálico como ánodo es probablemente su característica más atractiva, ya que este tiene una capacidad específica 10 veces superior a la de los ánodos basados en grafito usados en la actualidad. Diversas variaciones composicionales de $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ (LLZO) dopado con Al, Nb, Ta, Y, Ga han sido objeto de estudio buscando una mejora de sus propiedades eléctricas y estabilidad frente a la reacción con H_2O y CO_2 .

En general, el desarrollo de electrolitos para ASSLBs sigue dos vías paralelas: la optimización de las composiciones de los materiales empleados (buscando nuevas estructuras o dopando con elementos que hagan más estables o mejor conductoras las actualmente utilizadas) y el desarrollo de nuevos procesos de fabricación que permitan aumentar la eficiencia electroquímica en operación, principalmente mejorando las interfaces con los electrodos [9]. En este sentido, mediante el desarrollo de electrolitos híbridos orgánico-inorgánico, consistente en la adición de partículas cerámicas a una matriz polimérica sólida [10] se consiguen mejoras en las propiedades mecánicas de los electrolitos sólidos al mismo tiempo que se favorece el contacto en las interfases. Respecto al uso de electrolitos 100% poliméricos, la adición de la carga inorgánica mejora las propiedades eléctricas de estos compuestos debido a la modificación de la estructura local de la fase polimérica, reforzada además por la adición de partículas con alta conductividad de Li [11]. La matriz polimérica más comúnmente usada se basa en PEO, mientras

que las partículas cerámicas adicionadas pueden dividirse entre materiales conductores como LLZO, LAGP, LLTO o LGPS y materiales pasivos con alta superficie específica como ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , CNT o diversas arcillas.

4. Reutilización y reciclado de baterías

Debido al cambio de paradigma en la movilidad, dentro de 20 años se estima que el 35% de los vehículos nuevos sean eléctricos. El componente de mayor valor en este tipo de vehículos es la batería, especialmente en los vehículos eléctricos. Los tipos de baterías más empleados son: Ni-Cd, Ni-hidruro metálico (Ni-Mh) y sobre todo, las baterías de ion-litio (BIL). La implementación de las baterías en otra aplicación una vez terminada su vida funcional podría conseguir que la tecnología de las baterías fuera más sostenible en términos de impacto medioambiental de la fuente de carga cuando se acoplen a las energías renovables y también mejorar las preocupaciones ambientales sobre la eliminación de las baterías al final de su vida útil. Por ejemplo, la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos retiradas para aplicaciones secundarias aplaza su fase de reciclado, que conlleva costos y una contaminación inevitable. La prolongación de la vida útil de las baterías también contribuye a reducir los desechos y la explotación de los recursos.

La separación, la eliminación y el reciclado de los diversos y valiosos materiales que componen las baterías mencionadas es otro desafío que hay que superar. El reciclado de las BIL permite reducir el consumo de energía, las emisiones de CO_2 , ahorra recursos naturales evitando la extracción de minerales críticos y las importaciones, minimiza la toxicidad ambiental, crea un beneficio económico y reduce la generación de residuos [12]. Se estima que solo el reciclado de los metales contenidos en las baterías podría ahorrar hasta el 13% del coste por kWh, comparando con el coste de una batería nueva, aunque actualmente menos del 3% de las baterías se reciclan en todo el mundo [13]. Las baterías BIL están constituidas por un ánodo que contiene grafito (15-25% en peso) y Cu (8-10% en peso), además de un aglutinante (1-2% en peso) y un cátodo que concentra la mayor parte de los metales existentes en la misma. Los contenidos metálicos más significativos son Co (5-20%); Ni (5-10%); Li (1,5-7%); Mn (5%); y Al (5-8%). Los procesos de reciclado de las BIL se centran en la recuperación del Co y Ni, que junto con el acero y el aluminio de las carcasas y celdas constituyen el mayor interés industrial. Sin embargo, el Li, Mn y el grafito raramente se consideran en el proceso de reciclado. A pesar de ello, la tendencia actual es la reducción de los contenidos en Co en las baterías y en la sustitución por otros metales. Los cambios en los electrolitos y en los metales constituyentes de las baterías BIL obligan al desarrollo de procesos de reciclado flexibles, que puedan adaptarse también a los distintos diseños.

Otros importantes retos de los procesos de reciclado de BIL son: el manejo seguro de los componentes debido a la exposición del electrolito y la exposición de litio metálico; la escalabilidad; la estandarización y la simplificación de los pasos del tratamiento. Un esquema típico de proceso para el reciclado de las BIL consiste en las siguientes etapas [14]: *preparación* (clasificación de las baterías por tipos; desmantelamiento selectivo; clasificación de componentes) y *pre-tratamiento*: mediante procesos térmicos (evaporación de los componentes orgánicos), mecánicos (trituration y molienda), físicos (flotación por espumas), químicos (procesos hidrometalúrgicos) o mecano-químicos, seguidas de procesos de recuperación de metales ya sean por *procesos hidrometalúrgicos*, que permiten la recuperación de los metales con alta pureza, una buena eficiencia y un bajo consumo de energía; *procesos pirometalúrgicos*, basados en la fusión reductora para la obtención de un lingote multi-metal que posteriormente se refina, normalmente mediante procesos hidrometalúrgicos.

Estos procesos se caracterizan por su alto coste de inversión, elevado consumo de energía, emisiones de gases peligrosos y pérdida del Li que se concentra en la escoria. Sin embargo, son procesos que pueden ser aplicados a todos los tipos de baterías o *procesos bio-hidrometalúrgicos*, éstos son una alternativa menor, que solo se emplea a escala de laboratorio. La etapa final de los procesos de reciclado consiste en la separación selectiva de los distintos metales, normalmente mediante extracción con disolventes orgánicos y líquidos iónicos, precipitación o electrolisis. Industrialmente, las tecnologías más utilizadas se basan en procesos pirometalúrgicos, a pesar de los inconvenientes, lo que hace necesaria la búsqueda de soluciones más ecológicas y eficientes. Las tecnologías hidrometalúrgicas son complejas y su viabilidad depende en gran medida de la composición del cátodo.

En resumen, se puede afirmar que no existen tecnologías claramente viables para el tratamiento de las baterías de ión-litio que han alcanzado el final de su ciclo de vida lo cual, va a constituir un gran desafío a medio-largo plazo cuando el número de estas baterías sean verdaderamente significativo. Otra de las estrategias sostenibles es la reutilización de algunos de los componentes de las baterías en la creación de nuevos materiales avanzados, incluyendo algunos de los componentes existentes en las propias baterías. Un caso interesante es el de la preparación de colectores de corriente basados en materiales compuestos de carbón y polímero de bajo coste para sustituir los actuales de grafito prensado que poseen un alto precio. Estos nuevos materiales compuestos pueden incluso estar reforzados con fibra de carbono recicladas, que les van a dotar de excelentes propiedades específicas de rigidez y resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión y a agentes químicos, buen comportamiento a fatiga, y bajo peso. Todas estas propiedades les convierten en un candidato ideal como elemento no solo estructural

para un gran número de aplicaciones. Además, los nuevos materiales presentan conductividad térmica, eléctrica, propiedad barrera, capacidad de detección del daño o funcionalidad de autorreparación, mediante la inclusión de nanopartículas de carbono, como los nanotubos de carbono o el grafeno.

5. Conclusiones

El desarrollo de nuevos materiales que permitan mejorar las propiedades de almacenamiento de energía en las baterías es de crucial importancia. Como se ha señalado en este trabajo, aspectos como la sostenibilidad, la reutilización y el reciclaje de las baterías son esenciales, ya que sin el progreso en estas áreas, la futura demanda de baterías no podría ser cubierta y el daño al medio ambiente podría ser irreparable. La integración de estos aspectos en las investigaciones actuales contribuirá a nuevos desarrollos innovadores que requerirán un firme compromiso por parte de los investigadores, fabricantes, legisladores y usuarios.

6. Agradecimientos

Grupos de investigación Polymer Composite Group (ICTP), Fuels conversion (ICB), ProCaCEF (INMA), TecnoEco (CENIM).

PTI Mobility 2030 (<https://pti-mobility2030.csic.es/>)

7. Referencias

- [1] Sovacool B. K., Ali S. H., Bazilian M., Radley B., Nemery B., Oktaz J. and Mulvaney D. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, 2020; 367, 30-33.
- [2] Hammami, A., Raymond, N., Armand, M. Runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*, 2003; 424, 635-636.
- [3] Titirici M., White R. J., Brun N., Budarin V. L., Su D. S., del Monte F., Clark J. H., and MacLachlan M. J. Sustainable Carbon Materials. *Chem. Soc. Rev.*, 2015; 44, 250-290.
- [4] Tang C., Titirici M. M., Zhang Q. A review of nanocarbons in energy electrocatalysis: Multifunctional substrates and highly active sites. *Journal of Energy Chemistry*, 2017; Vol. 26, 1077-1093.
- [5] Liu Q., Pan Z., Wang E., An L. And Sun G. Aqueous metal-air batteries: Fundamental and applications. *Energy Storage Materials* 2020; 27, 478-505.
- [6] McKerracher R. D., Figueredo-Rodriguez H. A., Alegre C., Aricó A.S., Baglio V., Ponce de León C. Improving the stability and discharge capacity of nanostructured $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{C}$ anodes for iron-air batteries and investigation of 1-octanethiol as an electrolyte additive. *Electrochimica Acta*, 2019; 318, 625-634.
- [7] Knoop J. E., Ahn S. Recent advances in nanomaterials for high-performance Li-S batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 2020; Vol. 47, 86-106.
- [8] Zheng F., Kotobuki M., Song S., Lai M. O., Lu Li. Review on solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 2018; 389, 198-213.

^[9] Pasta M., Armstrong D., Brown Z. L., Bu J., Castell M. R., Chen P., Cocks A., Corr S. A., Cussen E. J., Darnbrough E. 2020 roadmap on solid-state batteries, *J. Phys. Energy* 2020; Vol. 2, number 3.

^[10] Wu Z., Xie Z., Yoshida A., Wang Z., Hao X., Abudula A., Guan G. Utmost limits of various solid electrolytes in all-solid-state lithium batteries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019; 109, 367–385.

^[11] Li S., Zhang S. Q., Shen L., Liu Q., Ma J. B., Lv W., He Y. B., Yang Q. H. Progress and Perspective of Ceramic/Polymer Composite Solid Electrolytes for Lithium Batteries, *Adv. Sci.* 2020; 7, 1903088.

^[12] Bankole O. E., Gong C. and L. Lei L. Battery Recycling Technologies: Recycling Waste Lithium Ion Batteries with the Impact on the Environment In-View, *J. Environ. Ecol.*, 2013; 4, 14.

^[13] Sonoc A., Jeswiet J. and Soo V. K., *Procedia CIRP*, 2015; 29, 752–757.

^[14] Mossali E., Picone N., Gentilini L., Rodríguez O., Pérez J. M. and Colledani M., *J. Environ. Manage.*, 2020; 264, 110500.