

SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, MEDIOAMBIENTE Y SOCIEDAD:

Avances en la  Agenda 2030



Efraín Gómez Arias
Esmeralda Cervantes Rendón
Antonio Rodríguez Martínez



El Colegio de
Chihuahua
Institución Pública de Investigación y Posgrado



© El Colegio de Chihuahua
Calle Partido Díaz 4723
Colonia Progresista, C.P. 32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tel. +52 656 639 0397
www.colech.edu.mx



Este texto fue sometido a doble proceso ciego a cargo de académicos externos a esta institución.

Primera edición en formato electrónico 2024.
ISBN: 978-607-8214-82-2

Coordinación de los procesos editoriales: E. Liliana Chaparro Vielma
Diseño de cubierta y diagramación: Regina García
Corrección y edición: Joel Amaya Gardea



Licencia Creative Commons:
Atribución – No Comercial – Sin Derivadas.

PUBLICACIÓN EN ACCESO ABIERTO: Se autoriza cualquier reproducción total o parcial de esta obra, siempre y cuando sea sin fines de lucro o para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente sin alteración del contenido y dando los créditos autorales.

Hecho en México
Made in Mexico

CAPÍTULO 4.

SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA CON TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICO

**Viridiana Aca López,¹ Erick Leonel Espinosa Villatoro,²
Juan David Garay Marín,³ Óscar Pérez Díaz,⁴ Enrique Quiroga González^{1*}**

¹ Instituto de Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Puebla, México. 72000.

² Stanford Synchrotron Radiation Lightsource, SLAC National Accelerator Laboratory. Menlo Park, California, Estados Unidos, 94025.

³ Instituto Tecnológico Nacional de México campus Boca del Río. Boca del Río, Veracruz, México. 94290.

⁴ Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Santa María Tonantzintla, Puebla, México. 72840.

*equiroga@ieee.org

Resumen

Uno de los puntos clave para el uso eficiente de energía y para el desarrollo de nuevas tecnologías de generación y electromovilidad es el almacenamiento de energía. Dentro de los diferentes conceptos de almacenamiento, el electroquímico de energía es el que presenta las mayores eficiencias y densidades energéticas. No se podría concebir la electrónica móvil ni los autos eléctricos sin baterías recargables. Por otro lado, tampoco sería posible tener sistemas de energía renovable aislados de la red eléctrica que funcionen de manera autónoma, de-

bido a su intermitencia. Para esta última aplicación, el espacio necesario para la instalación de un sistema de almacenamiento juega un rol importante, por lo que sistemas con alta densidad energética son usualmente la opción recurrida. En el presente capítulo se expone una paleta de dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía, denotando sus propiedades, así como ventajas, disponibilidad y costos, para apoyar en la toma de decisiones en el desarrollo de aplicaciones energéticamente sustentables.

Palabras clave: **Almacenamiento electroquímico de energía; sustentabilidad energética; baterías.**

Abstract

One of the key points for an efficient energy usage and to develop new technologies for energy generation and for electromobility, is energy storage. Among the different energy storage concepts, the electrochemical energy storage is the one with the highest efficiencies and energy densities. One could not think about mobile electronics, neither about electric cars, without rechargeable batteries. On the other hand, it could also not be possible to have autonomous renewable energy systems, due to their intermittency. For this application, the necessary space to install an energy storage system plays an important role; thus, systems with high energy storage densities are commonly the selected option. In the present chapter, a palette of electrochemical energy storage devices is presented, denoting their properties, advantages, availability and costs, to help to take decisions when developing energetically sustainable applications.

Keywords: **Electrochemical energy storage; energy sustainability; batteries.**

Introducción

Son tres los pilares que hay que cuidar para un desarrollo energéticamente sustentable: la generación de energía, el almacenamiento de esta y su uso. Es importante que la energía provenga de una fuente “limpia” (que su generación cause un mínimo impacto ambiental) y “renovable” (que su origen sea casi ilimitado, como lo es el viento, la luz del Sol, las mareas y el calor interno de la Tierra) para que sea sostenible. En el otro extremo, el uso de la energía producida también debe ser consciente, cuidando la eficiencia. Esto, porque a pesar de que el producirla sea relativamente limpio, su huella ambiental no es cero. Entre menos energía consumamos, menor será la necesidad de generarla, y por ende menor será la necesidad de fabricar e instalar plantas de generación.

Finalmente, entre la fuente de energía y el uso eficiente de la misma se encuentra el concepto de almacenamiento de energía, que no es otra cosa que guardarla para su posterior uso. El guardar energía en un dispositivo permite transportarla de un lado a otro, evitar su desperdicio almacenando cualquier energía producida en exceso, tenerla disponible aun cuando haya intermitencia en su generación, y tener una fuente de energía cuando no exista otra fuente en un sistema aislado.

No es concebible un futuro energético sostenible sin almacenamiento de energía, y para esto se requieren dispositivos de almacenamiento. Dentro de los más comunes, con los que tenemos contacto diariamente, se encuentran las baterías recargables, también llamadas secundarias. Estas son un medio de almacenamiento electroquímico, es decir, requieren de reacciones químicas que solo se posibilitan al conectarse a un circuito eléctrico externo. Existe una diferencia de potencial entre sus electrodos (cátodo y ánodo), y se produce una corriente eléctrica de origen electroquímico al conectar un circuito externo (algo que necesitamos alimentar de energía).

El almacenamiento electroquímico es el que presenta las mayores eficiencias y densidades energéticas, comparado con otros tipos de almacenamiento. Su existencia ha venido a revolucionar a la electrónica, posibilitando la electrónica móvil, y está permitiendo planear una transición de movilidad con autos eléctricos (electromovilidad). De manera adicional, sistemas electroquímicos de almacenamiento posibilitan el desarrollo de sistemas de energía renovable aislados de la red eléctrica. El almacenamiento electroquímico de energía atiende sus problemas de intermitencia, además de que lo hace ocupando poco espacio, por su alta densidad energética. Existe una gran variedad de tipos de baterías recargables y cada una tiene su nicho de aplicación, ya sea por su potencia, su densidad energética, sus ciclos de vida, su seguridad, su costo o su carácter amigable con el medioambiente. En el presente capítulo se expone una paleta de dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía, denotando sus propiedades, así como sus ventajas, disponibilidad y costos, para apoyar en la toma de decisiones en el desarrollo de aplicaciones energéticamente sustentables.

Baterías recargables con electrolito ácido

Batería de plomo-ácido

La batería de plomo-ácido (Pb-ácido) es una batería recargable, considerada la primera de este tipo. Están presentes en el mercado desde hace 160 años aproximadamente. Su éxito a través de los años probablemente se deba a las ventajas que ofrecen, por ejemplo: son de fácil fabricación, son robustas para cualquier tipo de operación (rápida o convencional), soportan altas tasas de descarga y a pesar de ser muy pesadas no requieren de un contrapeso adicional en el caso de ser usadas para energizar maquinaria pesada. Por otro lado, entre sus desventajas se encuentran que son fabricadas con materiales altamente contaminantes y el número de ciclos de carga/descarga es limitado, además de requerir mantenimiento cada determinado tiempo.

La demanda de las baterías Pb-ácido es amplia; de esta manera, se pueden encontrar en automóviles convencionales, bicicletas eléctricas, montacargas y otros tipos de vehículos comerciales, además de usos estacionarios incluyendo UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida), telecomunicaciones y almacenamiento de energía alternativa. Para satisfacer esta demanda existe un gran número de compañías que se dedican a manufacturarlas. Las cinco principales son Panasonic Corporation, GS Yuasa Corporation, EnerSys, East Penn Manufacturing Co. y Leoch International Technology Limited (Mordor Intelligence, 2023).

Los costos de estas baterías se estiman entre \$150 y \$200 USD/kWh, dependiendo del fabricante, la capacidad de las celdas y el número de ciclos carga/descarga que dure (Keshan et al., 2016).

La estructura de una batería Pb-ácido se basa en el apilamiento de un determinado número de celdas unidas por medio de barras metálicas. Cada celda está formada por un par de placas, una positiva cubierta de una pasta de dióxido de plomo (PbO_2) y una negativa hecha de plomo esponjoso (Pb). Las placas se encuentran separadas por un material aislante (separador) y están inmersas en una solución acuosa con ácido sulfúrico (electrolito), de ahí que reciben el nombre de baterías de Pb-ácido. Cuando las placas se encuentran en ese estado, es decir, con PbO_2 en la placa positiva, Pb en la placa negativa y la concentración de ácido es alta, se dice que la batería está cargada. Por otro lado, al haber sulfato de plomo ($PbSO_4$) en ambos electrodos y la concentración de ácido es baja, se dice que la batería está descargada. El cambio en la densidad del electrolito puede servir como indicador del estado de carga de la batería y de si es necesario dar mantenimiento o reemplazarla (Hioki, 2020). La reacción electroquímica completa que se lleva a cabo durante la carga/descarga es (Ecuación 1):



Por otro lado, las baterías de Pb-ácido pueden clasificarse en de ciclo corto (*shallow-cycle*) y de ciclo profundo (*deep-cycle*) de descarga. Las primeras están pensadas para aportar energía puntualmente, las placas que la forman son finas y no permiten hacer ciclos profundos, pero sí fuertes demandas de corriente durante breves periodos, lo que se conoce como potencial de arranque (CCA). Cuanto mayor sea el CCA, mayor es la capacidad de arranque de un automóvil convencional, con el motor en frío.

Las baterías de ciclo profundo o *deep-cycle* están diseñadas para soportar repetidos ciclos de carga y descarga hasta por 80 % de su capacidad sin afectar su desempeño. Sus placas son más gruesas y con alta densidad del material activo, diseñadas para proveer cantidades relativamente bajas de corriente por largos periodos. El uso de este tipo de baterías se encuentra limitado por su peso excesivo y su lenta recarga.

El potencial de una batería de Pb-ácido puede ser de 6 V, 12 V o algún múltiplo de 2 ya que el potencial de cada celda es de 2 V. Por otro lado, la densidad de energía por peso es de 40 Wh/kg.

Baterías recargables con electrolito básico

Baterías de NiCd

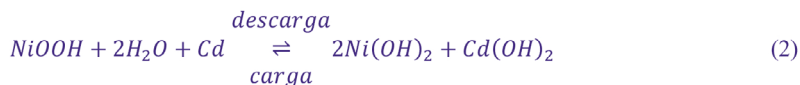
Después del desarrollo de la batería de plomo-ácido (Pb-ácido) pasaron aproximadamente 50 años antes de que la segunda batería recargable estuviera comercialmente disponible. Esta fue la de níquel-cadmio (NiCd), inventada por el científico sueco Waldemar Jungner en 1899 (Lopes y Stamenkovic, 2020), que ofrecía muchas ventajas sobre las baterías de Pb-ácido, aunque sus costos de producción eran elevados (Bukhari et al., 2015; Liang et al., 2019). La primera batería de NiCd fue la ventilada de bolsillo, caracterizada por su alta fiabilidad, robustez y larga duración. Este modelo fue capaz de operar eficazmente en un amplio rango de temperaturas.

Posteriormente se desarrolló la de placa sinterizada, cuya densidad de energía es superior y puede llegar a ser hasta 50 % mayor que la de su predecesor. La batería de placa sinterizada mantiene la mayoría de las características favorables de la batería de bolsillo, aunque su precio generalmente es más elevado.

El siguiente gran avance en el sistema NiCd fueron las baterías selladas, las cuales incluyen características de diseño específicas para evitar la acumulación de presión en la batería, causada por la gasificación durante la sobrecarga (Beard y Reddy, 2019; Liang et al., 2019). Las pilas y baterías de NiCd selladas están disponibles en diferentes tipos de construcciones, siendo las cilíndricas las más comunes. Además, se producen baterías de botón más pequeñas y rectangulares (Shukla et al., 2001; Zhou et al., 2022). Sin embargo, es importante mencionar que estas cada vez se usan menos (a favor de las baterías de NiMH) debido a su efecto memoria y al cadmio, que es muy contaminante (Shukla et al., 2001).

En los últimos años el mercado de baterías recargables pequeñas, como las de níquel-cadmio (NiCd), hidruro metálico de níquel (NiMH) e iones de litio (Li-ion) ha experimentado un aumento en su demanda (~20 %) debido en gran parte a su uso por ejemplo en teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y más recientemente en vehículos eléctricos e híbridos. En una celda NiCd, el ánodo está compuesto por cadmio y el cátodo por óxidos de níquel. Las características de una batería NiCd se pueden encontrar en la Tabla 1 (Shukla et al., 2001; Zhao et al., 2022). Las baterías recargables de NiCd son fabricadas por varias compañías, incluidas Sanyo, Panasonic, Probattery, Tenergy, Moonrays, entre otras (Lin et al., 2022).

Las reacciones electroquímicas básicas que ocurren durante los procesos de carga y descarga de una batería NiCd se ilustran en la Ecuación 2. Al momento de la descarga, el óxido de níquel trivalente se reduce a hidróxido de níquel divalente con el consumo de agua y el cadmio metálico se oxida para formar hidróxido de cadmio. En la carga, se producen las reacciones opuestas (Lin et al., 2022; Lopes y Stamenkovic, 2020).



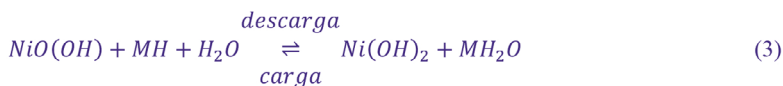
Baterías de NiMH

La batería recargable sellada de hidruro metálico (MH) es una tecnología de almacenamiento de energía eléctrica que ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a su alta densidad de energía y bajo costo. Fue en 1989 cuando la Yuasa Battery Company presentó las primeras baterías de hidruro de níquel-metal (NiMH) comercialmente disponibles, gracias a las investigaciones lideradas por su inventor Masahiko Oshitanu (Lin et al., 2022; Zhou et al., 2022). En su diseño, una batería de NiMH cuenta con un ánodo compuesto por una aleación AB_5 o AB_2 , donde A está constituido por una aleación de tierras raras: La, Ce, N y Pr (lantano, cerio, nitrógeno y praseodimio), mientras que B es una aleación de Ni, Co, Mn y Al (níquel, cobalto, manganeso y aluminio). El cátodo, por su parte, es idéntico al de las baterías de NiCd (níquel/cadmio), mientras que el electrolito es una solución alcalina, generalmente KOH (acuoso) (Fetcenko et al., 2007; Lopes y Stamenkovic, 2020).

La elección de la aleación utilizada en el ánodo determina en gran medida las características de la batería. La aleación AB_2 , por ejemplo, ofrece una mayor capacidad por unidad de peso y volumen en un rango moderado de temperatura que la aleación AB_5 , aunque esta última tiene una densidad de capacidad ligeramente superior. En cualquier caso, las baterías de NiMH tienen casi el doble de densidad de energía que las baterías de NiCd, lo que las hace ideales para su uso en dispositivos de consumo, como los que se alimentan con baterías AA o AAA. En la Tabla 1 se resumen algunas de las características de estas baterías.

Generalmente se utiliza una aleación de lantano-níquel (LaNi_5), conocida como la base AB_5 , y aleaciones compuestas de Ti y Zr (titanio y circonio) conocidas como las de clase AB_2 . La aleación AB_2 tiene una mayor capacidad por unidad de peso y volumen (360-400 Ah/kg y

2 500-2 800 Ah/L, respectivamente) en un rango moderado de temperatura que la aleación AB₅ con una capacidad específica de 270-290 Ah/kg y una densidad de capacidad de 2 200-2 400 Ah/L. Estas características hacen de las baterías de NiMH unas de las recargables más disponibles en el mercado. Compañías como Panasonic, Energizer, Duracell y Rayovac han apostado por esta tecnología y ofrecen baterías de NiMH de distintos tamaños y precios. En cuanto a las reacciones electroquímicas (Ecuación 3) que se producen durante la descarga, estas consisten en la liberación de electrones del ánodo y la aceptación de los mismos por el cátodo, lo que genera una corriente eléctrica que puede ser utilizada para alimentar un dispositivo. Durante la recarga, el proceso se invierte y los electrones regresan al ánodo, lo que permite recuperar la energía almacenada en la batería (Shukla et al., 2001; Yartys et al., 2016; Young, 2018):



Para lograr un buen equilibrio entre las diversas propiedades electroquímicas, una aleación tipo AB₅ convencional usualmente contiene alrededor de 11, 1 y 3 % en peso de cobalto (Co) (USD \$30/kg), praseodimio (Pr) (USD \$132/kg) y neodimio (Nd) (USD \$66/kg), respectivamente. Los costos de estos tres elementos comparten el 25 % del costo total (Lopes y Stamenkovic, 2020; Young, 2016a).

Las baterías recargables de NiMH son dispositivos de almacenamiento de energía ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones con recientes avances importantes que han mejorado significativamente el desempeño de estas baterías (Fetcenko et al., 2007). A través del desarrollo de nuevos cátodos, ánodos y electrolitos, la potencia de las baterías de NiMH ha aumentado de menos de 200 a 1 200 Wh/kg comercialmente hasta 2 000 Wh/kg (Fetcenko et al., 2007). Adicionalmente, se ha logrado una mejora significativa en la capacidad del ánodo mediante el

uso de un líquido iónico como electrolito en lugar de la solución acuosa de KOH. Por su parte, el uso de ánodos de silicio (Si) de ultra alta capacidad con 3 635 mAh/g y la expansión de la ventana de potencial ha sido posible gracias a esta innovación. Estos avances representan importantes mejoras en la capacidad y el rendimiento de las baterías de NiMH y abren nuevas oportunidades para su uso en una amplia gama de aplicaciones de almacenamiento de energía (Yartys et al., 2016; Young, 2016b; 2018). La Tabla 1 presenta un comparativo de las propiedades de baterías NiCd y NiMH, siendo las últimas una mejora de las primeras.

TABLA 1. *Capacidades de rendimiento y características críticas de baterías de NiCd y NiMH*

Parámetros de rendimiento	NiCd	NiMH
Energía específica (Wh/kg)	45-65	60-95
Densidad de energía (Wh/L)	150-200	310-360
Ciclo de vida (hasta el 80 % de su capacidad)	1 100-1 500	600-1 100
Autodescarga a 20 °C/mes (%)	<20	<25
Tiempo de carga rápida (h)	1	1
Voltaje nominal de la celda (V)	1.20	1.20
Rango de temperatura de operación (°C)	-20-60	-20-60
Costo de adquisición (\$/Wh, en dólares)	0.5	0.5
Tolerancia de sobrecarga	Moderado	Bajo

Fuente: Información tomada de Shukla et al. (2001), Young, 2016a y Zhao et al. (2022).

Baterías de ion litio

Baterías de ion litio con cátodos de óxidos y fosfatos

Baterías de LiCoO₂

El LiCoO₂ (LCO), introducido por Goodenough como material catódico, fue la primera y la más exitosa forma comercial de cátodos de óxido de metal de transición en las baterías de ion litio (LIB). Originalmente fue comercializado por SONY y aún se utiliza en las baterías co-

merciales de ion litio de hoy en día. El Co y el Li, ubicados en sitios octaédricos, ocupan capas alternas y forman una simetría hexagonal. El LCO es un material de cátodo muy atractivo porque tiene varias características deseables que incluyen alto potencial de descarga, alta capacidad de energía, buen rendimiento de carga/descarga, relativa facilidad de síntesis y un alto voltaje de descarga estable (Bensalah y Dawood, 2016; Manthiram y Goodenough, 2021). El LiCoO_2 tiene una capacidad teórica de 274 mAhg^{-1} con voltaje nominal de 3.7 V, sin embargo, solo la mitad de los iones de litio pueden ser extraídos o insertados, lo que se refleja en una capacidad de 140 mAhg^{-1} , que es el 50 % de la capacidad teórica del material. Lo anterior, principalmente por un reordenamiento a partir de dicha composición, generando una distorsión estructural de hexagonal a monoclinica (Bensalah y Dawood, 2016; Nitta et al., 2015).

Las principales limitaciones son el alto costo del Co, la baja estabilidad térmica, la alta toxicidad y la rápida pérdida de capacidad por ciclo a altas tasas de corriente o durante ciclos profundos. Durante las últimas dos décadas se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas para encontrar materiales de cátodos con mayor capacidad y potencial que el LiCoO_2 (Bensalah y Dawood, 2016; Nitta et al., 2015). Las baterías de cátodo de LiCoO_2 no deberían ser descargadas a velocidades más allá de 1 C, por lo que se recomienda descargas a 0.8 C. Por lo anterior, no son confiables como baterías de almacenamiento para energías renovables, en donde se necesita por ciertos momentos suministrar a la red eléctrica toda la capacidad almacenada en la menor cantidad de tiempo (batería de potencia); sin embargo, es la química dominante en la electrónica portátil de fabricantes como Apple, Lenovo, Acer, Dell, HP y Toshiba (Zubi et al., 2018).

Baterías de LiMnO_4

En la búsqueda de solucionar los inconvenientes de la difusión de los iones de litio en las estructuras de los óxidos laminares, se propone sustituir estos por otros cátodos de estructura tridimensional, por ejemplo, de tipo espinela. Las espinelas cumplen con la forma (LiM_2O_4) , donde M

es un metal con dos estados de oxidación. El LiMn_2O_4 , o comúnmente conocido como LMO, es la espinela de manganeso (Mn) más usada. El manganeso tiene los estados de oxidación +3 y +4. Su estructura consiste en octaedros con estequiometría M_2O_4 , en la que el espacio intersticial interconectado permite una rápida difusión tridimensional del litio (Nitta et al., 2015).

En 1996, Moli Energy comercializó una celda de iones de litio con óxido de litio y manganeso como material de cátodo. La estructura de espinela tridimensional mejora el flujo de iones en el electrodo, lo que resulta en una menor resistencia interna y un mejor manejo de la corriente. En una batería tipo 18650, el Li-manganeso se puede descargar a corrientes de 20-30A con una acumulación moderada de calor. También es posible aplicar pulsos de carga de un segundo de hasta 50A. La espinela proporciona un voltaje superior al de los óxidos laminares y muestra una excelente estabilidad estructural con un voltaje de descarga de alrededor de 4 V, pero con capacidad y ciclabilidad inferior (ver Tabla 1).

Para mejorar su desempeño en el ciclado se han realizado sustituciones parciales del Mn por cationes como: Zn^{2+} , Mg^{2+} , Co^{3+} , Cr^{3+} , Al^{3+} y Ti^{4+} (Bensalah y Dawood, 2016). La capacidad real de una buena espinela de manganeso, que depende del proceso de síntesis, está comprendida entre 100 y 140 mAhg^{-1} y su vida es de 1 000 a 1 500 ciclos (Zubi et al., 2018). El LiMn_2O_4 es más barato, menos tóxico y reactivo que el LiCoO_2 , pero proporciona una menor capacidad ya que el material cambia de fase durante el ciclado cuando la intercalación/desintercalación de Li^+ ocurre por debajo de 3 V, provocando una pérdida relativamente alta de capacidad por ciclo.

Baterías de LiFePO_4

La estructura de tipo olivino LiMPO_4 (M = Fe, Mn, Co) es el material catódico más prometedor por su destacado rendimiento electroquímico, ciclabilidad, alta velocidad de carga/descarga y capacidad especí-

fica. El olivino puede describirse como esquinas octaédricas de MO_6 y esquinas tetraédricas de PO_4 que comparten el elemento oxígeno. Los compuestos con esta estructura tienen varias ventajas sobre otros materiales de cátodo, incluso su estructura de material apenas cambia durante la intercalación y la desintercalación de iones de litio (Nitta et al., 2015; Satyavani et al., 2016).

El LiFePO_4 (LFP) ha recibido la mayor atención debido a una serie de características deseables como bajo costo, no toxicidad, muy baja pérdida de capacidad por ciclo y buena estabilidad térmica y química (Nitta et al., 2015). El principal inconveniente que se presentaba en el fosfato de hierro litio, LiFePO_4 , era su bajo rendimiento electroquímico a temperatura ambiente debido a la baja difusión de iones de litio y la mala conductividad electrónica (Nitta et al., 2015; Satyavani et al., 2016). Desde entonces hasta su comercialización actual en baterías de ion litio (Yok Energy, Fullriver, Enerland, A123 Systems, LiFeBATT, etc.) se han llevado a cabo estudios de cómo afecta la síntesis del material, la introducción de dopantes, la presencia de recubrimientos y la morfología de las partículas en el desempeño de dicho compuesto.

El LiFePO_4 es por excelencia usado como cátodo para batería de potencia, siendo la única batería que soporta altas corrientes de descarga llegando a velocidades de hasta 25 C. También puede ser usado en sistemas de almacenamiento de energía como batería de potencia. Dentro de las químicas de las baterías de iones de litio, se estima que la tecnología de LiFePO_4 se utilizará más que otras químicas para almacenamiento estacionario, y se convertirá en la principal opción al menos hasta 2030.

Baterías de óxidos combinados

El NMC (níquel, manganeso, cobalto, LiNiMnCoO_2) con voltaje nominal de 3.65 V, tiene mayor capacidad y estabilidad térmica que los compuestos que la conforman por separado de LiCoO_2 , LiNiO_2 y

LiMnO_2 , además se produce a un menor costo. La motivación para mezclar estos compuestos es lograr un mejor desempeño del que se obtiene de manera individual con cada uno de ellos (Chikkannanavar et al., 2014; Manthiram et al., 2017).

El NCA (níquel, cobalto, aluminio, $\text{LiAl}_x\text{Co}_y\text{Ni}_z\text{O}_2$), comparado con otros grupos de cátodos de intercalación, ofrece una combinación de alta capacidad reversible (200-250 mAh g^{-1}), alto voltaje de operación (~ 3.8 V vs. Li/Li^+) y mejor estabilidad química sin pérdida de oxígeno, similar al NMC, solo que agregando aluminio para mejorar su estabilidad térmica y reducción de costo (Zeng et al., 2019). Sin embargo, dado que también comparte los problemas con NMC, los voltajes de funcionamiento suelen ser inferiores a 4.3 V, lo que limita su capacidad por debajo de 70 % del valor teórico.

Tanto las celdas NMC como las NCA son las baterías establecidas como material catódico por el que está apostando el mercado de vehículos eléctricos. Las marcas líderes en este ramo solo varían un poco la química del cátodo o en su caso agregan silicio al ánodo de grafito, dominando desde 2004 en la movilidad eléctrica híbrida (PHEV) como el Toyota Prius, Chevrolet Volt, VW Golf GT, etc., y completamente eléctricos (EV) como VW e-Golf, Nissan LEAF, Hyundai Ioniq Electric, BMW i3, Mercedes-Benz Clase B E Drive, etc. (Zubi et al., 2018; Chen et al., 2019).

En diciembre de 2018, BloombergNEF publicó los resultados de su novena encuesta de precios de baterías (Battery Price Survey). El precio anual ha sido un importante indicador en la industria y la caída de precios ha sido más que remarcable. El precio de 2010 a 2018 ha sufrido una depreciación de más de 70 %. En la Tabla 2 se presenta un comparativo de las características de diferentes cátodos de baterías con base en óxidos y fosfatos.

TABLA 2. Capacidad gravimétrica, voltaje de operación y densidad energética de algunos materiales de cátodos

Cátodo de batería de ion Li	Capacidad mAhg ⁻¹	Voltaje promedio de operación (V)	Ciclabilidad ciclos	Densidad de energía	
				Wh kg ⁻¹	Wh L ⁻¹
LiCoO ₂ (Bensalah y Dawood, 2016)	151	4.0	500–1 000	602	3 073
LiAl _{0.05} Co _{0.15} Ni _{0.8} O ₂ (NCA) (Zeng et al., 2019)	195	3.8	1 000–1 500	742	3 784
LiMn ₂ O ₄ (Zubi et al., 2018)	119	4.05	1 000–1 500	480	2 065
LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂ (NMC 333) (Zeng et al., 2019)	153	3.85	1 000–2 000	588	2 912
LiNi _x Mn _y Co _z O ₂ (Zeng et al., 2019)	220	4.0	1 500–2 000	720	3 600
LiFePO ₄ (Nitta et al., 2015)	161	3.40	2 000–3 000	549	1 976

Fuente: Elaboración propia.

Baterías de Li-S

El concepto de utilizar azufre (S) como electrodo en baterías fue introducido 1962 (Danuta y Juliusz, 1962). Este tipo de baterías es capaz de proporcionar capacidades teóricas de 2 500 Wh/kg a 2 800 Wh/l (Pera-munage y Licht, 1993). Estos sistemas pueden operar en un amplio rango de temperatura que va desde los -40 °C hasta los 80 °C. Por otro lado, su proceso de fabricación es compatible con baterías de ion litio, por lo que la producción no sufriría cambios que se vean reflejados en el costo final (Zhang et al., 2017).

A pesar de lo anterior, debido a la naturaleza aislante del S es necesario adicionar grandes cantidades de material conductor (Dean, 1985). Por otro lado, también se presenta el decaimiento de la capacidad debido a la generación de varios polisulfuros intermedios solubles (Rauh et al., 1977), los cuales dan lugar a un mecanismo de transporte que reduce la utilización de material activo en el proceso de descarga haciendo que la eficiencia coulombica se reduzca rápidamente (Rao y Shropshire,

1981). Es así que se están probando diferentes conceptos de baterías de Li-S, incluso mezclando el azufre con otros materiales activos como el LiFePO_4 , para mejorar la velocidad de carga/descarga de estas baterías (Garay-Marín et al., 2021). Países como Estados Unidos, Japón y Rusia, además de la Unión Europea y compañías como Polyplus (Estados Unidos), Oxis Energy (Reino Unido) y Sion Power (Estados Unidos) (Zhang et al., 2017), financian el desarrollo de este tipo de baterías.

Baterías de ion litio con ánodo de Si

Por lo general las baterías de litio tienen un ánodo hecho de grafito, que tiene una capacidad de alrededor de 370 mAh/g. Este material es abundante y se puede conseguir tanto natural como sintetizado, a la vez que presenta una buena estabilidad química y buen rendimiento al usarse en baterías. Sin embargo, su capacidad ya no está siendo suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de muchas aplicaciones actuales.

El silicio (Si), por su parte, posee una capacidad de 4 200 mAh/g (Quiroga-González et al., 2011). A pesar de ser un material abundante en la corteza terrestre y de ser material básico en la electrónica, no puede ser utilizado como electrodo en baterías. Lo anterior se debe a la expansión de volumen (300 %) que sufre el Si debido a la inserción de Li en la estructura (Zhao, 2015), produciendo fracturas en el material pulverizándolo en pocos ciclos de carga/descarga (Liang et al., 2014), traduciendo-se en pérdida de contacto eléctrico entre el Si y el colector de corriente, perdiendo capacidad de almacenamiento. Lo anterior sugirió que existe un tamaño límite de partícula en donde el Si sería capaz de soportar el cambio de volumen sin sufrir fragmentación (Huggins y Nix, 2000), por lo que se han propuesto diversas geometrías y tamaños para estructurar el Si de manera que pueda ser utilizado como electrodo en baterías (Quiroga-González et al., 2013).

Una desventaja de disminuir el tamaño de las partículas de Si para su utilización en baterías es que durante la expansión volumétrica algunas

partículas se unen formando bloques densos que no contribuyen al almacenamiento de energía, por lo que la interacción entre partículas debe ser evitado (Dimov et al., 2003). Una solución es cubrir la superficie con una capa que sea iónica y electrónicamente conductiva; en este sentido, los materiales carbonosos poseen velocidades de transporte de iones y electrones elevada (Shen et al., 2018). En un sistema Si/C, el Si actúa como material activo almacenando gran cantidad de Li mientras que la matriz de C puede amortiguar la expansión de volumen del Si, además de mejorar la conductividad electrónica (Terranova et al., 2014). Por tanto, acoplando Si de baja dimensión con C se mejora la estabilidad durante el ciclado debido a que la expansión de volumen es amortiguada, además de que se minimiza la fractura y reformación de una capa de electrolito sólido (SEI). Hasta el momento son pocas las compañías que utilizan solo Si o Si/C en sus ánodos, ya que aún no han resuelto por completo su problemática relacionada con el cambio de volumen y de conductividad observado durante los ciclos de carga/descarga, a pesar de los diferentes esfuerzos que se están realizando a nivel internacional (Espinosa-Villatoro et al., 2021). Sin embargo, ya es común observar que estos materiales se usen como aditivo de ánodos de grafito, extendiendo su capacidad más allá de los 400 mAh/g.

Baterías metal-aire

Batería de zinc-aire

La batería zinc-aire (Zn-aire) fue descubierta a principios del siglo XIX y comercializada por primera vez en 1930 (Li y Dai, 2014). Sin embargo, en 1970 fue cuando salió al mercado la batería Zn-aire con las características que actualmente tiene (Chen et al., 2018). Cuenta con las ventajas de proporcionar una alta densidad de energía a un bajo costo, estar fabricada con materiales de baja toxicidad y económicos, además de tener una baja tasa de autodescarga, siempre y cuando se almacene bajo las condiciones adecuadas. Por otro lado, dentro de sus desventajas se en-

cuentra la sensibilidad a la humedad y reducción de la conductividad por la formación de carbonatos.

Existen baterías Zn-aire no recargables y recargables. Las primeras pueden ser empleadas en aplicaciones en las que la demanda de carga es continua y de baja potencia, por ejemplo, en el área médica, en telecomunicaciones, en señalización vial y en instrumentos de ayuda a la navegación. Las baterías Zn-aire recargables surgen como una opción para emplear en vehículos eléctricos ya que son mucho más económicas que las baterías de ion litio (LIB) (Li y Dai, 2014). Algunas de las compañías que fabrican baterías de Zn-aire no recargables son Energizer y Cegasa, mientras que Zinc8 Energy Solutions Inc. fabrica baterías Zn-aire recargables y NantEnergy produce ambos tipos (Bussewitz, 2018). El costo de las baterías de zinc-aire es de aproximadamente \$150 USD/kWh, pero para una opción más generalizada, el precio está por debajo de \$100 USD/kWh.

La batería Zn-aire está caracterizada por el acoplamiento de zinc metálico como electrodo negativo y un electrodo positivo que respira oxígeno continuo e inagotable del aire circundante. Este electrodo puede estar hecho de carbón poroso, carbón activado o nanotubos de carbono, además de un catalizador basado en un óxido metálico. Por otro lado, el aire, al no ser almacenado en el cuerpo de la batería, la hace más ligera y aumenta su capacidad específica de almacenamiento y energía por unidad de masa o volumen. El electrolito es de naturaleza alcalina, por ejemplo hidróxido de potasio, hidróxido de sodio o hidróxido de litio.

La implementación de un sistema electroquímico recargable en este tipo de baterías requiere del desarrollo y mejora de sus componentes. Tal es el caso del catalizador, en donde se requiere que sea bifuncional, es decir, que promueva la reacción de reducción de oxígeno (ORR) durante la descarga y la reacción de evolución de oxígeno (OER) durante la carga.

Además del catalizador bifuncional, para que una batería Zn-aire sea recargable es necesario que haya una regeneración del Zn, que puede darse de manera eléctrica, mecánica o hidráulica (Zhang, 2009), siendo

la regeneración eléctrica la de mayor potencial ya que no requiere de sistemas adicionales externos. El procedimiento de regeneración eléctrica consiste en la formación de zinc metálico a partir de óxido de zinc (ZnO) producido durante la descarga (ver Ecuación 2) y el oxígeno se oxida para producir oxígeno en una reacción OER.

El potencial estándar de las baterías Zinc-aire es de 1.65 V, aunque en la práctica sus voltajes de trabajo son más bajos, generalmente menores a 1.2 V para obtener densidades de corriente de descarga considerables. Para baterías recargables, las reacciones electroquímicas no se pueden revertir hasta alcanzar un voltaje de carga de 2.0 V, que ocasiona que tengan una eficiencia energética $<60\%$ (Li y Dai, 2014). La densidad energética, incluyendo el oxígeno, es de 1 086 Wh/kg (Li y Dai, 2014) o 1 400 Wh/L (Chen et al., 2018).

Baterías de Li-aire

El concepto de batería de Li-aire fue introducido por primera vez en 1996 (Abraham y Jiang, 1996). Este tipo de baterías consiste en un ánodo de Li y un cátodo poroso. Durante la descarga Li se oxida en Li^+ y el oxígeno del aire se reduce en peróxido o anión de óxido, el cual combinado con los iones de Li^+ del electrolito forma Li_2O_2 y Li_2O . Los poros en el cátodo sirven como canales difusores de gas que permiten el flujo libre del oxígeno, acomodando sus productos insolubles (Zhang y Zhang, 2015).

Este tipo de baterías presenta diversas ventajas, por ejemplo, su energía específica (Skylas-Kazacos et al., 2013) y el hecho de ser amigables con el medioambiente. No obstante, presentan algunas desventajas, entre ellas que dependen en gran medida de las condiciones ambientales, por ejemplo, de la presión atmosférica. Por último, no solo la reacción en el cátodo entrega la mayor parte de energía, sino que sufre de decaimiento de voltaje (Kraytsberg y Ein-Eli, 2011).

En la actualidad diversos grupos se encuentran realizando pruebas a distintos materiales para poder sobreponer los problemas previamente mencionados, tal es el caso de MikroMasch, que realiza estudios con el propósito de entregar las primeras baterías comerciales de Li-aire. Por otro lado, R&D Systems se ha interesado en su utilización como posible fuente de energía para vehículos eléctricos (Yamamoto, 2014).

Conclusiones

Hay una vasta variedad de baterías recargables en el mercado, con propiedades varias. Algunas nos ofrecen alta potencia instantánea, alta capacidad específica, un alto voltaje o un voltaje estable, y otras son simplemente muy económicas. No hay una solución única de almacenamiento para atender ciertas necesidades; sin embargo, sí hay soluciones óptimas. En este capítulo se ha presentado una paleta de tipos de baterías, que puede ayudar a la toma de decisiones a la hora de diseñar y desarrollar sistemas energéticos sustentables. Esto es uno de los ejes principales dentro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, misma que se denota en el presente libro. No puede haber un sistema energético completamente sustentable sin almacenamiento de energía, ya que este posibilita el uso de fuentes de energía renovable (intermitentes) y apoya en maximizar la eficiencia, además de impactar en el desarrollo económico, y permite sostener la sociedad tecnologizada actual (como base de la movilidad eléctrica y dispositivos electrónicos móviles). Se puede decir que el almacenamiento de energía es parte fundamental del eje de sustentabilidad energética, pero impacta de forma directa en los ejes de medioambiente y sociedad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Conahcyt por su apoyo económico a través del proyecto grupal de Ciencia de Frontera 21077 y el proyecto Pronaces 316537. De la misma forma, se agradece el apoyo de VIEP-BUAP a través del proyecto 00185-VIEP2023.

REFERENCIAS

- Abraham, K. M., y Jiang, Z. (1996). A polymer electrolyte-based rechargeable lithium/oxygen battery. *Journal of the Electrochemical Society*, 143(1), 1-5. <https://doi.org/10.1149/1.1836378>
- Beard, K. W., y Reddy, T. B. (2019). *Linden's handbook of batteries*. McGraw-Hill Education.
- Bensalah, N., y Dawood, H. (2016). Review on synthesis, characterizations, and electrochemical properties of cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Material Science & Engineering*, 5(4), 258. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000258>
- Bukhari, S. M. A. S., Maqsood, J., Baig, M. Q., Ashraf, S., y Khan, T. A. (2015). *Comparison of characteristics - lead acid, nickel based, lead crystal and lithium based batteries* [Conference session]. 2015 17th UKSim-AMSS International Conference on Modelling and Simulation (UKSim), Cambridge, UK, 444-450. <https://doi.org/10.1109/UKSIM.2015.69>
- Bussewitz, C. (2018, 26 de septiembre). *Zinc-air batteries provide power in remote areas*. Phys Org. <https://phys.org/news/2018-09-zinc-air-batteries-power-remote-areas.html>
- Chen, J., Zhu, L., Jia, D., Jiang, X., Wu, Y., Hao, Q., Xia, X., Ouyang, Y., Peng, L., y Tang, W. (2019). $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ cathodes exhibiting improved capacity retention and thermal stability due to a lithium iron phosphate coating. *Electrochimica Acta*, 312, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.153>
- Chen, X., Zhou, Z., Karahan, H. E., Shao, Q., Wei, L., y Chen, Y. (2018). Recent advances in materials and design of electrochemically rechargeable zinc-air batteries. *Nano Micro Small*, 14(44).

- Chikkannanavar, S. B., Bernardi, D. M., y Liu, L. (2014). A review of blended cathode materials for use in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 248, 91-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.052>
- Danuta, H., y Juliusz, U. (1962). *Electric dry cells and storage batteries*. (U.S. Patent No. US3043896A). <https://patents.google.com/patent/US3043896A/en>
- Dimov, N., Kugino, S., y Yoshio, M. (2003). Carbon-coated silicon as anode material for lithium ion batteries: advantages and limitations. *Electrochimica Acta*, 48(11), 1579-1587. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00030-6)
- Espinosa-Villatoro, E., Nelson-Weker, J., Ko, J. S., y Quiroga-González, E. (2021). Tracing the evolution of processes occurring in silicon anodes in lithium ion batteries by 3D visualization of relaxation times. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 892, 115309. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115309>
- Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J., Zallen, A., Mays, W., y Ouchi, T. (2007). Recent advances in NiMH battery technology. *Journal of Power Sources*, 165(2), 544-551. <https://doi.org/10.1016/J.JPOW-SOUR.2006.10.036>
- Garay-Marín, J. D., Quiroga-González, E., Garza-Tovar, L. L., Reuter, F., Kensy, C., Althues, H., y Kaskel, S. (2021). High-performing Li-ion battery with “two cathodes in one” of sulfur and LiFePO₄ by strategies of mitigation of polysulfide shuttling. *Batteries & Supercaps*, 4, 359-367. <https://doi.org/10.1002/batt.202000238>
- Hioki. (2020). *Lead-acid battery handbook. User's guide*. Hioki E. E. Corporation.
- Huggins, R. A., y Nix, W. D. (2000). Decrepiation model for capacity loss during cycling of alloys in rechargeable electrochemical systems. *Ionics*, 6(1-2), 57-63. <https://doi.org/10.1007/BF02375547>
- Dean, J. A. (1985). *Lange's handbook of chemistry*. McGraw-Hill.
- Keshan, H., Thornburg, J., y Ustun, T. S. (2016). *Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems* [Conference session]. 4th IET Clean Energy and Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1-7. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1287>

- Kraytsberg, A., y Ein-Eli, Y. (2011). Review on Li-air batteries - Opportunities, limitations and perspective. *Journal of Power Sources*, 196(3), 886-893. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.031>
- Li, Y., y Dai, H. (2014). Recent advances in zinc-air batteries. *Chemical Society Reviews*, 43, 5257. <https://doi.org/10.1039/C4CS00015C>
- Liang, B., Liu, Y., y Xu, Y. (2014). Silicon-based materials as high capacity anodes for next generation lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 267, 469-490. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2014.05.096>
- Liang, Y., Zhao, C. Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J. Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M. M., Chueh, Y. L., Yu, H., y Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6-32. <https://doi.org/10.1002/INF2.12000>
- Lin, J., Zhang, X., Cai, L., Fan, E., Wu, S., Ma, S., Wu, F., Chen, R., y Li, L. (2022). Recycling of rechargeable batteries: Insights from a bibliometrics-based analysis of emerging publishing and research trends. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 3(2), 2100153. <https://doi.org/10.1002/aesr.202100153>
- Lopes, P. P., y Stamenkovic, V. R. (2020). Past, present, and future of lead-acid batteries. *Science*, 369(6506), 923-924. <https://doi.org/10.1126/science.abd3352>
- Manthiram, A., y Goodenough, J. B. (2021). Layered lithium cobalt oxide cathodes. *Nature Energy*, 6(3), 323-323. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00764-8>
- Manthiram, A., Song, B., y Li, W. (2017). A perspective on nickel-rich layered oxide cathodes for lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 6, 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.10.007>
- Mordor Intelligence. (2023, 30 de septiembre). *Mercado de baterías de plomo-ácido: crecimiento, tendencias, impacto de COVID-19 y pronósticos*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/lead-acid-battery-market#:~:text=%C2%BFQui%C3%A9nes%20son%20los%20principales%20fabricantes,de%20bater%C3%ADas%20de%20plomo%2D%C3%A1cido>

- Nitta, N., Wu, F., Tae Lee, J., y Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.mat-tod.2014.10.040>
- Peramunage, D., y Licht, S. (1993). A solid sulfur cathode for aqueous batteries. *Science*, 261(5124), 1029-1032. <https://doi.org/10.1126/science.261.5124.1029>
- Quiroga-González, E., Ossei-Wusu, E., Carstensen, J., y Föll, H. (2011). How to make optimized arrays of Si wires suitable as superior anode for li-ion batteries. *Journal of Electrochemical Society*, 158(11), E119-E123. <https://doi.org/10.1149/2.069111jes>
- Quiroga-González, E., Carstensen, J., y Föll, H. (2013). Optimal conditions for fast charging and long cycling stability of silicon microwire anodes for lithium ion batteries, and comparison with the performance of other Si anode concepts. *Energies*, 6(10), 5145-5156. <https://doi.org/10.3390/en6105145>
- Rao, B. M. L., y Shropshire, J. A. (1981). Effect of sulfur impurities on Li / TiS_2 cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 128(5), 942-945. <https://doi.org/10.1149/1.2127579>
- Rauh, R. D., Shuker, F. S., Marston, J. M., y Brummer, S. B. (1977). Formation of lithium polysulfides in aprotic media. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 39(10), 1761-1766. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(77\)80198-X](https://doi.org/10.1016/0022-1902(77)80198-X)
- Satyavani T., Srinivas Kumar A., y Subba, P. (2016). Methods of synthesis and performance improvement of lithium iron phosphate for high rate Li-ion batteries: A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.06.002>
- Shen, X., Tian, Z., Fan, R., Shao, L., Zhang, D., Cao, G., Kou, L., y Bai, Y. (2018). Research progress on silicon/carbon composite anode materials for lithium-ion battery. *Journal of Energy Chemistry*, 27(4), 1067-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.12.012>
- Shukla, A. K., Venugopalan, S., y Hariprakash, B. (2001). Nickel-based rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 125-148. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00890-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00890-4)

- Skyllas-Kazacos, M., Menictas, C., y Lim, T. (2013). Redox flow batteries for medium-to large-scale energy storage. *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*, 398-441. <https://doi.org/10.1533/9780857097378.3.398>
- Terranova, M. L., Orlanducci, S., Tamburri, E., Guglielmotti, V., y Rossi, M. (2014). Si/C hybrid nanostructures for Li-ion anodes: An overview. *Journal of Power Sources*, 246, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.07.065>
- Yamamoto, O. (2014). Introduction. En N. Imanishi, A. Luntz y P. Bruce (Eds.), *The Lithium Air Battery: Fundamentals* (pp. 1-21). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8062-5_1
- Yartys, V., Noreus, D., y Latroche, M. (2016). Metal hydrides as negative electrode materials for Ni-MH batteries. *Applied Physics A*, 122(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9538-9>
- Young, K. H. (2016a). Electrochemical applications of metal hydrides. *Compendium of Hydrogen Energy*, 289-304. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-363-8.00011-6>
- Young, K. H. (2016b). Research in nickel/metal hydride batteries 2016. *Batteries*, 2(4), 31. <https://doi.org/10.3390/batteries2040031>
- Young, K. H. (2018). Research in nickel/metal hydride batteries 2017. *Batteries*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES4010009>
- Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., y Amine, K. (2019). Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(27), 1900161. <https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>
- Zhang, H., Li, X., y Zhang, H. (2017). *Li-S and Li-O₂ Batteries with High Specific Energy*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0746-0>
- Zhang, S. S., y Zhang, Z. (2015). Oxygen redox catalyst for rechargeable lithium-air. En Z. Zhang y S. Zhang (Eds.), *Rechargeable Batteries. Green Energy and Technology* (pp. 541-557). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15458-9_19

- Zhang, X. (2009). Zinc electrodes: Overview. En J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (pp. 454-468). Elsevier.
- Zhao, H. (2015). Lithium titanate-based anode materials. En Z. Zhang y S. Zhang (Eds.), *Rechargeable Batteries. Green Energy and Technology* (pp. 157-187). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15458-9_6
- Zhao, Z., Walia, G. K., Li, G., y Tang, T. (2022). Recycling battery metallic materials. Nano technology for battery recycling. *Remanufacturing, and Reusing*, 321-347. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91134-4.00007-8>
- Zhou, D., Guo, X., Zhang, Q., Shi, Y., Zhang, H., Yu, C., Pang, H., Zhou, D., Guo, X., Zhang, Q., Shi, Y., Zhang, H., Pang, H., y Yu, C. (2022). Nickel-based materials for advanced rechargeable batteries. *Advanced Functional Materials*, 32(12), 2107928. <https://doi.org/10.1002/ADFM.202107928>
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., y Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>