

El litio y su cadena de valor

Lithium and its value chain

Rogelio Zarza-Díaz^a

Abstract:

Lithium is a critical element to achieve the migration from the use of fossil fuels to clean energy, therefore the current trend lies in its exploitation, transformation, product manufacturing and distribution, these stages being the main links in the lithium value chain. It is important to understand the main characteristics of each link to potentiate them and thus allow the corresponding science, technology, and legislation to facilitate the energy transition while considerably respecting the environment, the geographical region and society. This research presents the generalities of the extraction of lithium from minerals, brines and clay lithium, as well as the refining and manufacturing treatments to obtain the main product derived from lithium, Li-ion batteries. Finally, any product with a high demand needs a distribution network with sufficient capacity to supply the requirements. Analyzing the lithium value chain will allow the community to improve existing opportunities in search of the well-being of humanity.

Keywords:

Lithium, value chain, batterie.

Resumen:

El litio es un elemento crítico para lograr la migración del uso de combustibles fósiles a energías limpias, por ello la tendencia actual radica en su explotación, transformación, fabricación de productos y distribución, siendo estas etapas los principales eslabones de la cadena de valor del litio. Es importante comprender las características principales de cada eslabón para potencializarlas y así permitir que la ciencia, tecnología y legislación correspondiente faciliten la transición energética respetando considerablemente el medio ambiente, la región geográfica y la sociedad. En este manuscrito se presentan las generalidades de la extracción del litio proveniente de los minerales, salares y arcillas, así como los tratamientos de refinación y fabricación para obtener el producto principal derivado del litio; la batería de iones de litio. Finalmente, todo producto con una gran demanda necesita de una red de distribución con suficiente capacidad para abastecer los requerimientos. Analizar la cadena de valor del litio permitirá a la comunidad mejorar las oportunidades de mejora existentes en busca del bienestar de la humanidad.

Palabras Clave:

Litio, cadena de valor, batería.

Introducción

La problemática del cambio climático y la necesidad de descarbonizar las economías para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero han generado una revolución energética en los últimos años que ha permitido la incorporación de fuentes de generación renovable en las matrices de generación eléctrica y ha estimulado la promoción de la incorporación de vehículos eléctricos en los parques automotores en diferentes países. Esta

revolución ha provocado una importante demanda de los principales metales tecnológicos que se requieren para la fabricación de las tecnologías renovables y los vehículos eléctricos, entre los que destaca el litio, principal material constituyente de las baterías y acumuladores eléctricos necesarios para sostener la operación de la generación renovable y la movilidad eléctrica (Vásquez Cordano, 2018). Junto a este panorama, la globalización ha creado un ambiente competitivo mundial en el cual las empresas y los gobiernos se encuentran altamente involucrados. Por

^a Autor de Correspondencia, Departamento de Ingeniería Industrial, Tecnológico de Estudios Superior Jilotepec, <https://orcid.org/0000-0003-2320-5570>, Email: ronilo@hotmail.com

lo tanto, las decisiones estratégicas que se tomen dentro de las organizaciones y los gobiernos resultan vitales para la mejora de los niveles de competitividad. Actualmente, tanto los países como las empresas están haciendo frente al incremento e intensificación de la competencia mundial, a los rápidos avances tecnológicos, a las nuevas formas de competir y a la cada vez más demandante expectativa de los clientes. En consecuencia, hoy las organizaciones buscan la forma de mejorar su competitividad, las empresas examinan como diferenciarse de las demás mediante el desarrollo de actividades especiales o con el uso de recursos propios que les proporcione ventajas competitivas (Martínez Arroyo, 2019).

Una ventaja competitiva sostenida se obtiene cuando una empresa implementa una estrategia de creación de valor que no ha sido simultáneamente implementada por los competidores y estos no son capaces de duplicar los beneficios de esta estrategia (Barney, 1991). Razón por la cual, en un contexto de disminución de gases de efecto invernadero las empresas, gobierno, sociedad, ciencia y tecnología se encuentran desarrollando ventajas competitivas para migrar de combustibles fósiles al uso de energías más limpias alineadas con ventajas competitivas que le permita a las organizaciones mantener utilidades, al gobierno un plan de acción frente a los acuerdos mundiales, a la sociedad movilidad y comunicación eficaz, todo ello consagrado en los pilares de la ciencia y tecnología.

Existen soluciones en el mercado sostenidas en ventajas competitivas como lo son las baterías de iones de litio, que son capaces de ofrecer grandes densidades energéticas, y los supercondensadores que permiten almacenar grandes densidades de potencia y ciclabilidad. Desafortunadamente, las baterías y los supercondensadores son tecnologías complementarias. Es decir, la fortaleza de una es la debilidad de la otra, y viceversa, y no existe una solución integral que combine todos los requisitos que la mayoría de las aplicaciones demandan (CIC Energi GUNE, 2023) sin embargo, las investigaciones actuales buscan desarrollar tecnología que permita reducir la brecha para ofrecer productos con mayor ciclabilidad y duración de las cargas.

La demanda de baterías de litio aumentó un 30% anual entre 2010 y 2018 y se espera que siga creciendo a una tasa anual del 25% hacia 2030. La electrificación del transporte y de las redes eléctricas serán los principales impulsores de estas proyecciones. A nivel mundial, en 2030 el 60% de la demanda de este tipo de baterías provendrá de los automóviles de pasajeros y un 23% vendrá de los vehículos comerciales. El consumo de baterías de litio es muy bajo en América Latina y el Caribe,

mientras que en China es y seguirá siendo el mercado más grande a nivel mundial, con un 43% del consumo. Las proyecciones para 2030 indican que la demanda mundial incrementará hasta 14 veces la capacidad de las baterías para los vehículos eléctricos para satisfacer las demandas de los consumidores y la promesa de una economía baja en carbono. Con estas proyecciones se alcanzarían 2600 Gw en 2030. Debido al probable incremento de las baterías de litio y plomo, es necesario profundizar el análisis de los materiales de este tipo de residuos y monitorear la implementación de sistemas adecuados de acopio y manejo de residuos peligrosos. Sin el debido manejo, estos residuos pueden ocasionar diversos problemas al mezclarse con otros materiales e incrementar el riesgo para los operadores de sistemas de manejo de residuos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2021).

Cadena de valor del litio

En este material, se presenta un panorama general de la cadena de valor del litio, donde se exponen los principales eslabones con sus características más significativas, la proyección de electrificación, así como sus impactos y beneficios a la sociedad y medio ambiente, todo ello en busca de la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, causa principal del calentamiento global. La cadena de valor de una organización identifica pues, las principales actividades que crean un valor para los clientes y las actividades de apoyo relacionadas. La cadena permite también identificar los distintos costos en que incurre una organización a través de las distintas actividades que conforman su proceso productivo, por lo que constituye un elemento indispensable para determinar la estructura de costos de una compañía. La cadena empieza con el suministro de materia prima y continúa a lo largo de la producción de partes y componentes, la fabricación y el ensamble, la distribución al mayoreo y menudeo hasta llegar al usuario final del producto o servicio (Quintero & Sánchez, 2006).

La cadena de valor significa lograr la fluidez de los procesos centrales de una organización para llevar un producto desde la producción hasta la comercialización, donde se efectúa una interrelación funcional basada en la cooperación (Frances, 2001).

La cadena de valor comprende la secuencia de actividades dependientes y relacionadas que son necesarias para llevar un producto satisfactoriamente, desde la etapa de la producción hasta el consumo (Cayeros Altamirano, Robles Zepeda, & Soto Ceja, 2016). Así una cadena puede ser formada por empresas de una

economía local, una región, un país o un conjunto de países, es decir cadenas globales de valor (Isaza, 2008). Uno de los principales objetivos de las cadenas de valor es la generación de ventajas competitivas que se entienden como las características o atributos de un producto o servicio que le dan una cierta superioridad sobre sus competidores inmediatos (Quintero & Sánchez, 2006).

Por lo anterior, el análisis de la cadena de valor del litio comprende los siguientes eslabones (Figura 1); explotación minera, procesos de transformación, aplicaciones, finalmente logística y transporte.



Figura 1. Cadena de valor del litio.
Fuente: Elaboración propia

Antes de comenzar con el análisis de la cadena de valor, existe una pregunta a considerar, ¿Por qué el litio? es imposible imaginar la vida moderna sin la energía que proveen los átomos de litio. Este elemento, el más liviano de los metales y con una elevada reactividad química, es la materia prima primordial con la que se construyen las baterías eléctricas de alto rendimiento. Debido a que estas baterías son más pequeñas, proporcionan más energía y presentan mayor durabilidad que las tradicionales, son la fuente de energía preferida por la industria tecnológica. Además de ser el componente principal de las baterías, el litio tiene otras aplicaciones en las industrias de la cerámica, energía nuclear y en la fabricación de grasas lubricantes, aires acondicionados, gomas sintéticas y aluminio. Debido a sus múltiples aplicaciones, y sobre todo a su rol como componente principal en el desarrollo tecnológico de las sociedades y la producción de energía limpia, en 2010 el litio fue declarado elemento estratégico por la Unión Europea y los Estados Unidos. Es a partir de entonces cuando comienza a incrementarse de manera exponencial su precio y la demanda, tanto para su uso en la industria automotriz como en la electrónica (Boda & García, 2020).

El litio se encuentra en la segunda fila del grupo 1 de la tabla periódica de elementos, es decir, es el tercer elemento más liviano de los conocidos. Su radio atómico es pequeño, y su energía de ionización es baja. Todas estas características inciden favorablemente en el desempeño de los sistemas de almacenamiento de energía que lo utilizan (Tapia, Oliver Tolentino, González, & Ramos Sánchez, 2019). La alta eficiencia y densidad de energía son características técnicas que contribuyeron al

salto de la electrónica de consumo a nuevas aplicaciones como: movilidad eléctrica, electrificación de áreas rurales, aplicaciones en redes eléctricas de distribución, transmisión y sistemas de generación (Molina, 2017) y (Rosero García, García Sierra, Felipe Cerón, & Felipe Zuñiga, 2022).

Explotación Minera

Minerales de litio

Los minerales más aprovechables para obtener litio son la espodumena y petalita, una vez en la planta en primer lugar se le somete a un proceso de concentración, se le hace un chancado, molienda y flotación.

Después el producto obtenido se somete a una calcinación, tratándolo con ácido sulfúrico para tostarlo, el mineral tratado se envía a un estanque donde se extrae la materia soluble mediante lixiviación obteniéndose sulfato de litio. Posteriormente, se purifica el material y se concentra mediante evaporadores, al final se trata con carbonato de sodio obteniéndose carbonato de litio que es el que tiene usos industriales (Díaz Alcaraz, 2019).

En el caso de yacimientos en minas de roca dura, se utilizan las técnicas tradicionales de minería como la perforación y el rompimiento de la roca, el carguío y transporte del material obtenido para su lixiviación mediante óxido y purificación, lo que permite preparar el material para su posterior refinación siguiendo un esquema parecido al de los salares, solo que en este caso se obtiene principalmente concentrado de espodumena, que se utiliza en la industria cerámica, entre otras, pero que sus altas concentraciones de litio puede transformarse de nuevo para convertirse en otros compuestos químicos útiles para la industria, pero con un mayor costo (Aleida, 2022).

A partir de las salmueras

Más del 60% del litio del mundo se almacena en salmueras (Goto, Okumura, & Nakagawa, 2018), y son uno de los recursos más importantes para la extracción de litio. Sin embargo, el flujo del proceso es complicado y variable debido a su composición compleja que contiene varios elementos como Magnesio, Potasio, Calcio entre otros. En particular, la presencia de impurezas de Magnesio afecta significativamente la extracción de litio (Mu, Zhang, Zhang, & Wang, 2021). La relación de masa de Mg/Li siempre ha sido un indicador importante para evaluar la viabilidad de la extracción de litio de los lagos

salados. La mayoría de las salmueras en China tienen una relación de masa Mg/Li relativamente alto, por lo que la separación de magnesio y litio en los métodos tradicionales es difícil, lo que limita el desarrollo de la extracción de litio a partir de salmueras con una alta relación de masa Mg/Li (Liu, Baozhong, Yingwei, Chengyan, & Yongqiang, 2023).

La salmuera se obtiene mediante perforaciones en las salinas, de ahí se lleva mediante tuberías a piletas de secado para evaporar el agua que trae y eliminar las impurezas y concentrar el litio, las impurezas se devuelven a las salinas, este proceso de evaporación es controlado para evitar que se precipite el litio y deje de ser útil, posteriormente se le mezcla con cal y sulfato de sodio en muy pequeña cantidad (Díaz Alcaraz, 2019). Finalizadas estas operaciones ya está en condiciones de ser enviado a la planta para producir carbonato de litio, se le añaden diversos productos en función de la composición obtenida y el tipo de sal, en la primera fase pueden ser disolventes, ácido clorhídrico, carbonato de sodio, etc. Al final el producto obtenido; carbonato de litio que es el que se utiliza mayoritariamente para fabricar baterías (Díaz Alcaraz, 2019). En el caso de las salmueras, se comienza con la evaporación, la filtración y remoción de impurezas y la concentración de Cloruro de litio (LiCl), que por electrolisis produce el litio. Se comprende, entonces que es mucho menos costoso procesar las salmueras que los minerales (Valencia Giraldo, 2016).

Las salmueras salinas en América Latina se encuentran principalmente en Chile, Argentina y Bolivia, son los lugares en donde es más común que se realicen actividades extractivas por su bajo costo operativo; sin embargo, se bombean entre un millón y medio a dos millones de litros de agua para extraer una sola tonelada de litio; existen estimaciones de uso de 640 litros de agua por segundo para algunas minas en Chile, es decir, 55 millones de litros de agua por día, que se obtiene mediante evaporación para luego enviarse a una instalación de transformación que es donde se obtendrán los compuestos necesarios para la industria (Aleida, 2022).

A partir de arcillas

Las reservas de minerales de litio de tipo arcilla representan aproximadamente el 7% de las reservas totales de litio del mundo. Sin embargo, aún no se han desarrollado técnicas y recursos potenciales para la extracción de litio (Liu, Baozhong, Yingwei, Chengyan, & Yongqiang, 2023). Gu y colaboradores (Gu, Guo, & Wen, 2020) propone un proceso de lixiviación para arcilla

bauxítica rica en litio utilizando ácido sulfúrico diluido y ácido férrico como agentes de lixiviación. La extracción de litio fue mayor solo después de un tostado a 500-800 °C. Ahora bien, en los depósitos arcillosos la concentración de litio puede ser relativamente alta, pero las técnicas productivas para su obtención se siguen analizando, ya que en general es un proceso que está muy limitado debido a su complejidad. Sin embargo, no se pueden asegurar que no sea rentable, pues en la actualidad hay varios proyectos en América Latina, siendo el de México el más conocido y que se perfila para ser uno de los más importantes.

Vale la pena señalar que la mayor cantidad de reservas conocidas en el mundo de este mineral se localiza en América Latina, por lo que esta región se ha convertido en un mercado clave para la industria, pues entre Bolivia, Chile, Argentina, México, Perú y Brasil acumulan 61% del total de este recurso, mientras que extracción regional en el año 2021 representó el 34% del total mundial, en donde Chile, con 26 mil toneladas, Argentina con 6200 y Brasil con 1500 tienen varias posibilidades de aumentar su capacidad productiva debido a nuevos descubrimientos locales. Pero hay cuestiones importantes que pueden ensombrecer los supuestos beneficios obtenidos, es decir, la falta de una cadena productiva local que aproveche la transformación de estos recursos, así como la limitada capacidad tecnológica local para la extracción, lo que provoca que estos proyectos sean concesionados a empresas extranjeras teniendo muy poco peso el sector empresarial latinoamericano (Aleida, 2022).

Procesos de transformación

Electroquímica

Es una parte de la química que estudia la transformación entre la energía química y la energía eléctrica. Otra definición que engloba más conceptos sería el estudio de los fenómenos químicos causados por la acción de corrientes y voltajes y de las reacciones químicas que producen efectos eléctricos. Este tipo de reacciones son muy características y tienen nombre propio; son las reacciones redox. Las reacciones redox (nombre simplificado de reacciones de oxidación reducción) son aquellas donde se produce un intercambio de electrones entre reactivos, liberando uno de estos electrones y siendo aceptados por el otro reactivo (Villaescusa Leal, 2017).

Según la Agencia Internacional de Energía en su informe anual *World Energy Outlook* (WEO) del 2021 que estima un incremento del 19% de la demanda energética mundial

hasta el 2040. Actualmente el consumo energético proviene en gran medida de la combustión de energías no renovables como el carbón, petróleo y gas natural, estas energías fósiles son las principales causantes de las emisiones de los denominados gases de efecto invernadero (Karl & Trenberth, 2003). Los sistemas de almacenamiento electroquímico dan la posibilidad de almacenar y liberar energía eléctrica siempre que sea necesaria. Estos sistemas deben tener unos requerimientos básicos, tales como alta energía específica, alta potencia, alta densidad de energía, recargas rápidas, larga vida útil y no tener problemas de seguridad. Uno de los sistemas de almacenamiento electroquímico más utilizados en la industria y en la vida cotidiana son las baterías recargables (Fraile Insaugurbe, 2022).

Las baterías primarias son dispositivos desechables que no pueden recargarse, es decir, se suministran cargadas y se desechan una vez descargadas. Dentro de este tipo de baterías se encuentran entre otras las de zinc-aire, zinc-carbono, alcalinas y mercurio (H.O.F. Batteries, 2004). A diferencia de las baterías primarias, las baterías secundarias son un tipo de batería eléctrica que puede cargarse y descargarse muchas veces. Estas baterías recargables son sistemas capaces de convertir reversiblemente energía química en energía eléctrica mediante reacciones electroquímicas de oxidación y reducción (Luo, Wang, Dooner, Clarke, & Luo, 2015) y (Armand & Tarascon, 2008).

El aumento de la conciencia sobre la falta de sostenibilidad de los combustibles fósiles, los niveles de contaminación sin precedentes en los centros urbanos y el aumento del calentamiento global han creado un sentido de urgencia para transformar el sistema global de gestión de energía (Chu & Majumdar, 2012). Además, se ha renovado el interés por los vehículos eléctricos como alternativa a los vehículos con motor de combustión interna, responsables del 25% de las emisiones de efecto invernadero (Ding, Cano, Yu, Lu, & Chen, 2019).

Se prevé que la demanda mundial de baterías recargables de Li aumente de 78 GWh en 2019 a 1100 GWh en 2028, con un valor de mercado de \$129 mil millones esperado para 2027 (Ayman A, Mendoza García, & Jackie Y, 2022). Las baterías recargables de Li son actualmente el único candidato para satisfacer las necesidades globales de almacenamiento de energía para la electrónica de consumo y los vehículos eléctricos. También son un competidor muy fuerte para el almacenamiento en red. Las baterías recargables de Li se han desarrollado durante 30 años, su densidad de energía se ha duplicado

y las nuevas químicas prometen nuevos avances (Ayman A, Mendoza García, & Jackie Y, 2022).

En la actualidad dos tipos de sistemas de almacenamiento de energía electroquímicos complementarios representados por baterías de iones de litio (LIB) y supercondensadores ocupan los estados cruciales en el mercado, como vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles (Cao, y otros, 2017). Sin embargo, existen oportunidades de mejora con el proceso de difusión de los electrodos y la gran variación volumétrica que lo acompaña durante el proceso de carga/descarga ponen de manifiesto la densidad de potencia insatisfactoria y ciclo de vida inferior a los 1000 ciclos (Wu, y otros, 2019).

Para satisfacer los requisitos de alta energía y densidades de potencia, un dispositivo de almacenamiento de energía nuevo y especial, denominado condensadores de iones de litio (LIC), se ha convertido en un foco de atención, que puede incorporar las ventajas de las baterías y los supercondensadores (Jagadale, y otros, 2019). En principio, el LIC se ensambla mediante un ánodo tipo batería (dominado por el comportamiento de intercalación/desintercalación) y un cátodo tipo condensador (controlado por el comportamiento físico de adsorción/desorción) en un electrolito que contiene sal de litio, que podría combinar las ventajas de altas densidades de energía/potencia y estabilidad cíclica a largo plazo (Aravindan, Gnanaraj, Lee, & Madhavi, 2014).

En resumen, los LIC, como un tipo de dispositivos de almacenamiento de energía extraordinarios, integran la característica de alta energía de las baterías con las características de alta potencia y larga duración de los supercondensadores. Además, los materiales de carbono con dos mecanismos diferentes de almacenamiento de carga han sido ampliamente estudiados en el campo de los LIC, atribuyéndolos a bajos costos, abundantes recursos, alta conductividad, buena estabilidad fisicoquímica y excelente accesibilidad a los electrolitos. Aunque han realizado grandes esfuerzos en la fabricación de electrodos de carbono de LIC, los problemas críticos de los LIC, como el desajuste cinético y los problemas de desequilibrio de capacidad entre el ánodo y el cátodo, deben resolverse con urgencia. Por lo tanto, el diseño racional del electrodo de carbono de alto rendimiento afecta en gran medida el rendimiento electroquímico de los LIC (Kangyu, y otros, 2020).

Baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio, como una de las baterías recargables más avanzadas, están atrayendo mucho la atención en las últimas décadas. Actualmente son las fuentes de energía móviles dominantes para dispositivos electrónicos portables, utilizados exclusivamente en teléfonos celulares y computadoras portátiles (Deng, Kim, Lee, & Cho, 2009). Otro importante mercado en expansión para las baterías de iones de litio son los vehículos eléctricos e híbridos, que requieren baterías de iones de litio de próxima generación no solo con la alta potencia, sino también un rendimiento de seguridad mejorado dramáticamente y bajo costo (Da Deng, 2015). Un uso adicional de las baterías de iones de litio es para amortiguar el suministro intermitente y fluctuante de las energías verdes o limpias almacenando la energía generada, para posteriormente suministrarla cuando sea requerida.

Las baterías de iones de litio no sufren el problema del efecto memoria, a diferencia de las baterías de Ni-Cd. Las baterías de iones de litio tienen voltajes casi tres veces mayores que los valores de las baterías típicas basadas en Ni (Da Deng, 2015). Una batería de iones de litio se construye mediante celdas de iones de litio básicas conectadas en paralelo (para aumentar la corriente) en serie (para aumentar el voltaje) o configuraciones combinadas. Se pueden integrar múltiples celdas de batería en un módulo. Se pueden integrar varios módulos en un paquete de baterías. Por lo general, una celda básica de iones de litio consta de un cátodo (electrodo positivo) y un ánodo (electrodo negativo) que están en contacto con un electrolito que contienen iones de litio (Da Deng, 2015). El material más utilizado en el ánodo es el grafito para la mayoría de las pilas de iones de litio. El grafito está fácilmente disponible de forma natural o como un subproducto del petróleo, pero el precio varía según el proceso de tratamiento térmico (Zhenguo, y otros, 2010). Los electrodos están aislados entre sí por un separador, típicamente una membrana polimérica microporosa, que permite el intercambio de iones de litio entre los dos electrodos, pero no de electrones. Además del electrolito líquido, también se han explorado electrolitos de polímero, gel y cerámica para aplicaciones de baterías de iones de litio (Da Deng, 2015).

Las innovaciones que siguieron en las baterías de iones de litio giraron en torno a los tres componentes principales que son el ánodo, el cátodo y el electrolito, con el fin de mejorar las características y problemas que actualmente acompañan a esta tecnología, como la capacidad de potencia gravimétrica y volumétrica, seguridad, costo, eficiencia y la búsqueda de materiales que no dañen el

medio ambiente (Herrera Pérez, Pérez Zúñiga, Verde Gómez, Valenzuela Muñoz, & Vargas Bernal).

Proceso de fabricación de las baterías de iones de litio

I. Fabricación de electrodos

Compuesta de dos líneas de fabricación que son idénticas, pero una produce el ánodo y otra el cátodo, derivado de que estos componentes deben estar libres de cualquier tipo de contaminación.

a. *Mixing*

En el proceso de fabricación de los electrodos, la mezcla conocida como *slurry* es el primer paso, ya que está compuesto de los polvos o materiales activos, que se mezclan con un disolvente líquido y un aglutinante para obtener una masa pastosa. Existen dos tipos de equipos para la producción de *slurry*; equipos de producción por lote con mezcladores planetarios, o producción continua con alimentación gravimétrica automática.

b. *Coating & Drying*

Una vez producido es *slurry*, la mezcla viaja a través de tuberías hasta la zona de imprimación, donde la mezcla se imprime sobre un sustrato o bobina metálica que se desenrolla hasta el cabezal donde se deposita el *slurry*. Dicha bobina recubierta continúa su proceso a través de un horno de secado donde el disolvente se evapora dejando el material activo adherido a la lámina y distribuida uniformemente. Es necesario que el secado se haga de forma gradual para obtener una buena calidad del electrodo.

c. *Calendering*

Ahora se comprimirá el material y así poder asegurar una mejor adherencia, un espesor constante y densidad deseada.

d. *Slitting*

Es un proceso de corte que sirve para delimitar las bobinas a la medida de los electrodos individuales que se utilizarán en el ensamblado final. Es decir, las bobinas procedentes del calandrado (*mother roll*) atraviesan un banco de cuchillas y se cortan en múltiples bobinas más estrechas ajustándose al diseño final (*daughter rolls*)

II. Ensamblado de celdas (sala seca)

Finalizado el bloque de fabricación de electrodos, el proceso pasa a una segunda fase donde se procederá con el ensamblado de las celdas.

Las condiciones de ensamble deben realizarse en un ambiente seco para evitar que quede humedad en el electrodo, algo que puede conducir a la pérdida de capacidad, el aumento de la degradación o la creación de ácido fluorhídrico. Por ello, los electrodos pasan por hornos de vacío con el fin de reducir la humedad restante y se trasladan a un entorno controlado climáticamente que garantiza la calidad de las celdas. En esta etapa los electrodos se cortan a medida y se ensamblan en sus carcasas, aunque este proceso varía según el formato de celda (*pouch*, prismática o cilíndrica).

III. *Notching*

Para baterías tipo *pouch* el siguiente paso es cortar las bobinas en electrodos individuales para la celda.

a. *Stacking*

Tras el segundo corte, llega el proceso de *stacking* o apilamiento de las celdas, que a menudo supone un cuello de botella en el ensamblaje de celdas. Esta es la primera etapa en la que se combinan las líneas de cátodo y ánodo. El propósito es aplicar de forma alternada capas de ánodo, separador y cátodo y del mismo modo dejar al descubierto las pestañas sin recubrir.

b. *Pouch assembly*

Ahora las pestañas de los electrodos deben unirse a las terminales a través de un proceso de soldadura. Es entonces cuando la celda se inserta en su material de embalaje preformado dejando un borde abierto. El conjunto se llena con electrolito y se sella al vacío a lo largo del borde sobrante. El producto se deja en remojo durante horas antes de ser enviado a la siguiente fase.

IV. Formación, envejecimiento y validación

Una vez ensamblada, la celda se somete a una fase de acondicionamiento. La fase de formación, envejecimiento y validación, también conocida como *Formation, ageing and Testing (FA&T)*. Es la fase crítica en la que se hace una carga inicial a la celda y se evalúan sus características y rendimiento.

Electrolito

El electrolito debe elegirse cuidadosamente para resistir el entorno redox en ambos lados del cátodo y el ánodo y el rango de voltaje involucrado sin descomposición o degradación. Además, el electrolito debe ser inerte y estable en un rango de temperaturas aceptables. En las baterías comerciales de iones de litio, normalmente un

electrolito líquido es una solución de sales de litio en disolventes orgánicos. Sin embargo, el electrolito líquido orgánico existente puede potencialmente incendiarse en condiciones de fuga térmica o cortocircuito debido a la naturaleza volátil e inflamable de los solventes que son altamente tóxicos (Da Deng, 2015). Los electrolitos de polímero sólido son económicos, y no tóxicos. Los electrolitos de polímero de iones de litio tienen buena estabilidad química, pero la conductividad de los iones de litio sigue siendo inferior a los de los electrolitos de carbonato (Song, Wang, & Wang, 1999). El electrolito comúnmente utilizado en las baterías de ion-litio se basa en soluciones orgánicas que presentan alta inflamabilidad y, como consecuencia, problemas asociados a la seguridad de estas (Zhang, y otros, 2017).

Separadores

Los separadores son componentes esenciales de las baterías de iones de litio. De hecho, los separadores se usan comúnmente en la mayoría de los sistemas electroquímicos con electrolito líquido, incluidas las celdas de combustible, los capacitores y varios tipos de baterías basadas en una química diferente. El separador en una batería de iones de litio desempeña un papel fundamental para evitar el contacto físico directo entre el cátodo y el ánodo y evita que se produzca un cortocircuito. Al mismo tiempo, el separador permite el paso de los iones de litio del electrolito. Los separadores deben ser químicamente estables e inertes en contacto tanto con el electrolito como con los electrodos. De igual manera, se requiere que sea mecánicamente robusto para soportar la tensión y la perforación de los materiales de los electrodos y el tamaño de los poros debe ser inferior a 1 μm (Da Deng, 2015).

Aplicaciones

Funcionamiento de una batería de iones de litio

Durante el proceso de carga, los dos electrodos se conectan externamente a un suministro eléctrico externo. Los electrones se ven obligados a liberarse en el cátodo y moverse externamente al ánodo. Simultáneamente, los iones de litio se mueven en la misma dirección, pero internamente, del cátodo al ánodo a través del electrolito. De esta manera, la energía externa se almacena electroquímicamente en la batería. Lo contrario ocurre durante el proceso de descarga: los electrones se mueven del ánodo al cátodo a través de la carga externa para hacer el trabajo y los iones de litio se mueven del ánodo al cátodo en el electrolito. Esto también se conoce como mecanismo de *shuttle chair*, donde los iones de litio se

desplazan entre el ánodo y el cátodo durante los ciclos de carga y descarga (Da Deng, 2015). Durante la fase de carga, los átomos de litio liberan un electrón y migran al ánodo de carbono, durante la fase de descarga el fenómeno transcurre de forma contraria. Los compuestos químicos de las baterías de iones de litio comprenden también óxido de cobalto de litio, óxido de litio, manganeso entre otros (Barghamadi, Kapoor, & Wen, 2013).

Se sabe poco sobre los impactos ambientales de la producción, el uso y eliminación de las baterías de iones de litio en próximas generaciones (Zackrisson, Avellán, & Orlenius, 2010). La producción en masa de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos generará grandes volúmenes de desechos y lugares contaminados. Podría reducir la productividad agrícola cerca de las minas, disminuir la calidad del aire cerca de las instalaciones de procesamiento y aumentar el costo de energía cerca de las fábricas. Además, es posible que se requiera un uso adicional de combustibles fósiles para satisfacer la demanda de la fábrica en la producción de baterías de iones de litio (Da Deng, 2015).

Las preocupaciones ambientales sobre el uso de combustibles fósiles y sus limitaciones de recursos, combinadas con preocupaciones de seguridad energética, han estimulado un gran interés en generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables. La energía solar y eólica se encuentran entre las más abundantes y potencialmente disponibles (Meier, Wilson, Kulcinski, & Denholm, 2005). La energía de la radiación solar que recibe la tierra en 1 hora es suficiente para satisfacer las necesidades energéticas mundiales durante un año. La captura de un pequeño porcentaje de la energía eólica potencial también podría contribuir significativamente a cumplir con los requisitos de energía eléctrica del mundo. Si bien todavía se necesitan avances tecnológicos para cosechar energía renovable de manera económica, las tecnologías de energía solar y eólica han crecido rápidamente (Zhenguo, y otros, 2010). Con restricciones más estrictas sobre las emisiones de carbono, está surgiendo una tendencia general de electrificación de los usos finales basados en combustibles fósiles. La más destacada es la electrificación del transporte. Algunas estimaciones sugieren que entre el 30 y el 50 % de todas las compras de vehículos nuevos en 2030 serán vehículos híbridos enchufables (Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, 2007).

Dada la cantidad de energía almacenada, la seguridad también es un tema importante. Muchas tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, especialmente aquellas que operan electroquímicamente, tienen el

potencial de liberar su energía rápidamente si la estructura falla o si se exceden ciertos límites de temperatura. Una liberación de energía descontrolada puede variar desde un evento de fuga térmica que simplemente drena el sistema de almacenamiento de su energía hasta una descarga explosiva de energía. Una mejor seguridad y confiabilidad requieren el uso de materiales químicos intrínsecamente seguros y una mejor ingeniería de los sistemas de almacenamiento contra liberaciones de energía rápida y explosivas (Zhenguo, y otros, 2010).

El futuro del almacenamiento de la energía

Los avances logrados en las características operativas de las baterías han sido tan significativos, que este tipo de sistema de almacenamiento ha sido el motor para la transformación de la industria automotriz a vehículos eléctricos. Sin embargo, aún existe una variedad de problemas por resolver y desafíos (Tapia, Oliver Tolentino, González, & Ramos Sánchez, 2019):

1. La abundancia y disponibilidad geográfica del litio
2. Las dificultades de extracción y gasto energético y de recursos asociados
3. Los problemas ambientales que surgen de la fabricación de las baterías. Actualmente la fabricación de una batería de 100 kWh tiene una huella de CO_2 equivalente a la producida por un coche de gasolina durante 8 años

Una de las aplicaciones proyectadas con la tecnología derivada del litio son las llamadas Smart City que son un centro urbano que, sirviéndose de las nuevas tecnologías, pretende potenciar y volver más interconectada la vida de una sociedad. Su objetivo principal es mejorar los núcleos de movilidad y vivienda, para así fomentar un manejo más eficiente de energía, agua y residuos. Una Smart City quiere reorganizar la manera en la que vive la humanidad, teniendo como prioridad la convivencia e interacción de las personas al crear edificaciones más ecológicas, y de esa forma se pueda ser parte de una ciudad sustentable (BBVA, 2023). Sin embargo, las ciudades que adquieren o buscan este sello aspiran a aprovechar todo el potencial de todos los avances tecnológicos para ahorrar costes, ser más eficientes, prestar nuevos servicios, reducir su huella ambiental y fomentar la innovación.

Pero convertirse en una ciudad inteligente debe conducir a la mejora de la calidad de vida de sus ciudadanos, la pregunta es si este eslogan se hace realidad o, por el contrario, los proyectos de ciudades inteligentes hacen

que las ciudades lo utilicen como, puro marketing y autopromoción, y no como un proyecto metropolitano, que no beneficia a los ciudadanos, sino a las empresas que están dando ellos los servicios (Aguaded Ramírez, 2017).

El problema de las baterías de litio

El litio es fundamental para la creación de soluciones energéticas alternativas al uso de hidrocarburos tradicionales; durante la última década su uso se ha disparado debido a que supuestamente podría ser capaz de sostener las futuras estrategias de transformación energética. Sin embargo, esta narrativa se ha construido a partir de una comunicación inadecuada sobre el tema, pues si bien el litio no es fundamentalmente escaso, tampoco es un recurso transversal para el proceso de transformación energética, ya que se consideran más de 15 elementos críticos necesarios para lograr dicha transformación, como lo es el aluminio, cobalto, vanadio, zinc, neodimio, titanio, níquel, manganeso, cromo, cobre y molibdeno por mencionar algunos (Aleida, 2022).

Por sus características corrosivas y reaccionantes puede tener efectos muy nocivos para la salud humana debido a su alta y violenta inflamabilidad química, lo que provoca fuego y explosiones al hacer contacto con agua y combustibles, resultando en emanaciones tóxicas que pueden ocasionar irritación y quemaduras en la garganta, pulmones ojos y piel. La exposición a los vapores puede generar otras respuestas como náuseas, debilidad, vómitos, entre otros efectos graves que requieren revisión médica (Azamar Alonso, 2022).

De igual forma, resulta especialmente grave el daño que este metal puede generar en el ecosistema, pues ante una mala práctica en su manejo y operación suele reaccionar violentamente con el oxígeno y el vapor de agua, generando en el proceso hidróxido de litio, el cual es muy corrosivo, lo que afectaría severamente la fauna marina (Domínguez Ortega, Medina Ortiz, & Cabrera García, 2006). Por otro lado, los procesos de explotación y tratamiento en los que habitualmente se involucra la minería comprenden efectos nocivos sobre las actividades agrícolas, ganaderas y en la contaminación de recursos hídricos y ecosistemas (Ströbele Gregor, 2012).

Las baterías llevan también otros componentes fundamentales como níquel y cobalto. El cobalto se obtiene mayoritariamente en la República del Congo que posee el 50% de todo el cobalto del mundo, el otro gran productor es China. Las condiciones laborales de los mineros en muchos casos son muy penosas, según

UNICEF más de 40000 niños entre los tres y siete años trabajan en las minas del sur de este país, la extracción se hace a mano o con herramientas rudimentarias y sin ninguna protección (Díaz Alcaraz, 2019).

Logística y transporte

Es preferible que cada país produzca aquello en lo que es mejor, así conseguirá satisfacer las necesidades de sus pobladores e incluso generará remanentes, mismos que podrá intercambiar por otros productos que no pueda producir o bien, le resulte más baratos comprarlos que producirlos. En la actualidad esto conlleva a cada nación a decidir sobre que exportar e importar y el transporte es uno de los componentes más relevantes de la cadena de suministro, representa una de las áreas que permite lograr mayor competitividad en el mercado al desarrollar ventajas estratégicas a través de una gestión integrada de transporte (Gil Gaytán, 2017), pero el transporte de las mercancías depende directamente de la infraestructura logística, puesto que es un pilar fundamental de la sociedad moderna. Su adecuada dotación y administración posibilitan el desarrollo económico, generan crecimiento, aumenta la competitividad y la productividad.

Así mismo, esta actúa como eje básico de integración de un territorio nacional, que permite la inserción de las economías en el comercio internacional, minimizando el costo y tiempo de transporte, promoviendo la circulación de bienes y servicios. Tener carreteras, puertos, aeropuertos, ferrocarriles, entre otras obras de infraestructura, son indispensables para elevar la competitividad y productividad de un país. A nivel global, la importancia de la infraestructura logística en la economía de las naciones y su papel como propulsor para el desarrollo de otros sectores de alto valor agregado han provocado que diversos países tengan como uno de sus principales objetivos el desarrollo y fortalecimiento de este sector.

Los niveles de competitividad están estrechamente relacionados con el desarrollo de la infraestructura de los países, es importante destacar que la base material para el desarrollo y para acelerar los avances del bienestar de la población, depende en buena medida del crecimiento y rehabilitación de la infraestructura del país, ya que de ella depende el desenvolvimiento industrial, financiero, urbano y rural, así como de las capacidades para proveer los servicios que inciden directamente en el desarrollo económico, social y humano (Águila, Cervantes, Temoltzin, & Cuellar, 2017).

La logística es aquella parte del proceso de la cadena de suministro que planea, implementa y controla el flujo y almacenamiento de productos y servicios, y su información relacionada, desde el punto donde se originan hasta el punto donde se consumen, en forma eficiente y al menor costo posible, para satisfacer los requerimientos de los clientes. Debe haber un gran compromiso entre el gobierno, el sector educativo, las empresas de tecnología, los gremios industriales, las compañías consultoras en logística y administración de la cadena de suministros y la industria como actor principal para coordinar adecuadamente cada eslabón si se quiere que este proceso mejore considerablemente el nivel competitivo de las empresas (Ballesteros Riveros & Ballesteros Silvia, 2004). La eficiencia de los procesos logísticos gravita fuertemente en el desempeño operativo de las empresas, principalmente en la interacción con clientes y proveedores.

En un contexto más amplio, las condiciones de infraestructura y las políticas económicas son determinantes para hacer que el sector empresarial de un determinado país sea competitivo frente a los retos que plantea la globalización de la economía. Aun más allá, en un mundo globalizado y con serios problemas ambientales, la implementación de tecnologías de información logísticas es clave para mejorar la eficacia de los procesos, garantizar la sostenibilidad económica y reducir al máximo los impactos negativos que la actividad empresarial general al medio ambiente (Balza Franco & Cardona Arbelaez, 2020).

El modelo de abastecimiento estratégico se ha sido diseñado para ayudar a las compañías a definir alternativas como apoyo en sus procesos para conseguir la máxima ventaja de costos, calidad y tecnología, aprovechando el poder de compra y negociación que posee (Molander, 2014). El enfoque actual del abastecimiento estratégico impulsa iniciativas de gestión de la cadena de suministro. En primer lugar, los indicadores de evaluación de proveedores son más detallados y precisos, así como también, la compra pasa a ser más evaluada de acuerdo con el detalle de rendimiento (Zuluaga Mazo, Guisao Giraldo, & Molina Parra, 2011).

Las empresas que tienen un buen desempeño logístico y que logran una ventaja competitiva están proporcionando un nivel de servicio superior a sus clientes, aunque es desafiante integrar las combinaciones de recursos, habilidades y sistemas requeridos para lograr una logística adecuada, pero si esto se alcanza, difícilmente los competidores duplicaran tal desempeño integrado

(Cano Olivos, Orue Carrasco, Martínez Flores, Mayett Moreno, & López Nava, 2015). En cuanto a la logística, en el medio del comercio internacional, esta se considera la piedra angular del mismo y se define como el conjunto de obras e instalaciones que posibilitan el enlace entre los nodos de acopio, producción y consumo para satisfacer los requerimientos de las cadenas de suministro que interactúan entre ellos. Mediante el uso de los modos de transporte y el apoyo de instalaciones y terminales especializadas donde se materializan los movimientos de carga en combinaciones intermodales, mediante procesos de transferencia, transbordo, ruptura y trasvase de las mercancías (Valles Romero & Ortiz, 2011).

Por tanto, la gran demanda que se proyecta tanto de litio como los metales críticos para la transición energética así como los productos derivados de este proceso, necesita un sistema logístico tan robusto que permita el manejo de los materiales en cantidades, tiempo y requerimientos solicitados por el mercado, por tanto son necesarios los llamados operadores logísticos, que son empresas que ofrecen básicamente dos servicios principales: el almacenamiento y transporte de productos, y que con el tiempo han agregado una serie de servicios complementarios o inmediatos que por encargo de un cliente son diseñados dentro de la cadena de suministro, como, por ejemplo: servicios aduaneros, re embalaje, etiquetado, envasado entre otros (Granillo Macías, González Hernández, & Santana Robles, 2019) para así abastecer al ritmo de la demanda el litio y sus derivados.

La cadena de suministro, se puede hacer valer de la subcontratación, que se define como la contratación que una empresa hace a otra empresa, para que esta última realice parte de los servicios por los que la primera ha sido contratada directamente (Marasco, 2007) y así reducir los tiempos de servicio establecidos y que el ritmo de producción y entrega a los clientes no se vea afectado.

Si se habla del manejo y transporte de baterías de iones de litio, se tiene que tomar en cuenta que las baterías cargadas completamente tienen mayor riesgo de incendio. Por esto se debe realizar la carga en un lugar adecuado y bajo supervisión. Igualmente, debe evitarse un sobrecalentamiento por razones de radiación solar o acumulación de calor, por lo que se deberán tener en cuenta las siguientes recomendaciones básicas en el manejo y transporte (Industria Química, 2022):

- La carga de baterías nunca debe realizarse en el área de almacenamiento
- Debe existir una distancia considerable de la zona de carga de baterías de litio y cualquier combustible

- No se deben cargar baterías defectuosas o dañadas
- Se debe evitar la acumulación de calor durante la carga
- Utilizar solamente cargadores originales
- Evitar la carga sin supervisión

Consejos para el almacenamiento seguro de baterías

- Asegurar la protección de las baterías frente a daños mecánicos
- Almacenar por separado las baterías de litio
- Se recomienda una distancia de 2.5 m de la zona de almacén de otra instalación
- Disposición de extintores de incendios en la zona de carga de las baterías
- El desecho de las baterías debe ser apegado a la normativa aplicable en cada región
- No exponer de forma directa y permanente las baterías a temperaturas elevadas

Dadas las características físicas y químicas de las baterías de iones de litio, se debe considerar el tipo de materiales de los envases, empaque y embalajes, dado que contienen propiedades y características fisicoquímicas que permiten un manejo adecuado de los productos, adicionalmente, con respecto a la degradación y descomposición de estos, pueden presentar impactos significativos, por lo cual se requieren manejos adecuados acordes con las políticas ambientales y las directrices institucionales sobre el tema (Avella Guzmán, 2005).

Conclusiones

Aunque el litio es un elemento químico abundante en la naturaleza, su extracción depende directamente del medio donde se encuentre, dado que el método más usado actualmente es la extracción de las salmueras, sin embargo, la presencia de magnesio limita los procesos extractivos y de refinación. El desarrollo tecnológico busca mejorar los procesos de obtención de litio y obtener mayores cantidades de este elemento con la menor generación de residuos, cabe señalar, que a mayor demanda abra mayor impacto en el medio ambiente, puesto que la minería y los procesos de fabricación de productos derivados del litio afectan directamente el medio ambiente, por lo que las políticas gubernamentales deberán desarrollar procedimientos de remediación, trata y reciclaje del litio y sus derivados para el proceso de transición de uso de combustibles fósiles a energías limpias verdaderamente traigan consigo un beneficio ambiental.

El litio es un elemento muy prometedor y juega un papel trascendental en las nuevas economías circulares, donde el reciclaje es la clave del equilibrio en el actual consumo de la sociedad, por ello si se habla de litio, es necesario que se cuente con un sistema logístico que permita la movilidad del elemento en un entorno seguro y eficiente, donde los tiempos de entrega sean acorde con la demanda proyectada. El litio y su cadena de suministro tienen el potencial necesario para contribuir con el desarrollo económico del país mediante la generación de valor en cada uno de sus eslabones, generando empleos para la sociedad, atractivos para la inversión y recaudación fiscal. México presenta una promesa de participación considerable en la primera etapa de la cadena de valor del litio, pero poca proyección para las etapas de producción y distribución, por lo que es indispensable que los centros de investigación, instituciones de educación e iniciativa privada generen inercia y trabajen de forma colaborativa para impulsar la investigación, tecnología y conocimiento para que realmente el país sea competitivo con el litio y su proyección de transición energética se de en un entorno de responsabilidad social – ambiental, para que realmente sea un beneficio universal donde el resultado final sea el bienestar de la humanidad en armonía con su entorno.

La proyección para la extracción, transformación y distribución de productos derivados del litio revelan un panorama lleno de oportunidades para esta industria donde la investigación y el desarrollo de tecnologías podrán impulsar la eficiencia y capacidad de almacenamiento de energía, evolucionando la manera en la que hoy se almacena y utiliza esta. Así mismo, la colaboración entre los fabricantes de baterías, las empresas de desarrollo de tecnología e industria logística deberá de responder al ritmo de la demanda para afrontar los obstáculos venideros y que la adopción de las nuevas tecnologías del litio sean una realidad.

Referencias

- Aguaded Ramírez, E. (2017). Smart City and Intercultural Education. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 237, 326-333. doi:10.1016/j.sbspro.2017.02.010
- Águila, A., Cervantes, C., Temoltzin, D., & Cuellar, Y. (2017). Infraestructura logística para la competitividad de México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(5), 70-83.
- Aleida, A. A. (2022). El mito de la transición energética y la importancia del litio. In *Litio en América Latina. Demanda global contra daño socioambiental* (pp. 25-50). México: Universidad Autónoma Metropolitana.

- Aravindan, V., Gnanaraj, J., Lee, Y., & Madhavi, S. (2014). Insertion-type electrodes for nonaqueous Li-ion capacitors. *Chem Rev*, 114, 11619-11635.
- Armand, M., & Tarascon, J. (2008). Building better batteries. *Nature*, 451, 652-657. doi:doi.org/10.1038/451652A
- Avella Guzmán, Ó. (2005). Empaques, envases y embalajes: una propuesta normativa. *Tecnogestión. Una mirada al ambiente*, 11(1), 41-50.
- Ayman A, A., Mendoza García, A., & Jackie Y, Y. (2022). Advances in and prospects of nanomaterials morphological control for lithium rechargeable batteries. *Nano Energy*, 93, 1-19. doi:https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106860
- Azamar Alonso, A. (2022). La supuesta abundancia de litio en México. In *Litio en América Latina. Demanda global contra daño socioambiental* (pp. 53-86). México: Universidad Autónoma Metropolitana .
- Ballesteros Riveros, D., & Ballesteros Silvia, P. (2004). La logística competitiva y la administración de la cadena de suministros. *Scientia Et Technica*, X(24), 201-206. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84912053030>
- Balza Franco, V., & Cardona Arbelaez, D. (2020). La relación entre logística, cadena de suministro y competitividad: una revisión de literatura. *Espacios*, 41(19), 176-196. Retrieved from <https://www.revistaespacios.com/a20v41n19/20411913.html>
- Barghamadi, M., Kapoor, A., & Wen, C. (2013). A review on Li-S Batteries as a high efficiency rechargeable lithium battery. *Electrochem*, 160(8), A1256-A1263. doi:10.1149/2.096308jes
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17, 99-120.
- BBVA. (2023). BBVA Educación Financiera. (BBVA) Retrieved 07 13, 2023, from <https://www.bbva.mx/educacion-financiera/blog/que-es-una-smart-city.html>
- Boda, L., & García, G. (2020). Yacimientos de litio. El fin del reinado de los combustibles fósiles. *Revista de Comunicación de las Ciencias de la Tierra*(4), 4-11.
- Cano Olivos, P., Orue Carrasco, F., Martínez Flores, J., Mayett Moreno, Y., & López Nava, G. (2015). Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México. *Contaduría y administración*, 60(1), 181-203.
- Cao, D., Yin, C., Shi, D., Fu, Z., Zhang, J., & Li, C. (2017). Cubic perovskite fluoride as open framework cathode for Na-ion batteries. *Adv. Funct Mater*, 27(1701130).
- Cayeros Altamirano, S., Robles Zepeda, F., & Soto Ceja, E. (2016). Cadenas productivas y cadenas de valor. *Revista EDUCATECONCIENCIA*, 10(11), 6-12.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488, 294-303.
- CIC Energi GUNE. (2023). CIC Energi GUNE. (CIC Energi GUNE) Retrieved 07 13, 2023, from <https://cicenergigune.com/es/blog/condensadores-litio-ion-equilibrio-baterias-supercondensadores>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora. CEPAL. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11362/47309>
- Da Deng. (2015). Li-ion batteries: basics, progress and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418. doi:10.1002/ese3.95
- Deng, D., Kim, J., Lee, & Cho. (2009). Green energy storage materials: Nanostructured TiO₂ and Sn-based anodes for lithium-ion batteries. *Eng. Environ*, 2, 818-837.
- Díaz Alcaraz, M. (2019). El litio, su minería y sus efectos. *Formación preventiva*.
- Ding, Y., Cano, Z., Yu, A., Lu, J., & Chen, Z. (2019). Automotive Li-ion batteries: current status and future perspectives, *Electrochem. Energ. Rev.*, 2, 1-28.
- Domínguez Ortega, L., Medina Ortiz, O., & Cabrera García, A. (2006). Intoxicación con litio. *Anales de Medicina Interna*, 23(9), 441-445. Retrieved from https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0212-71992006000900010
- Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. (2007). Electric Power Research Institute and Natural Resources Defence Council. Palo Alto, California.
- Frailé Insagurbe, D. (2022). Nuevos electrolitos poliméricos monoconductores de Iones de Litio para baterías de Litio-Metal. Bilbao: Escuela de Ingeniería de Bilbao.
- Frances, A. (2001). Estrategias para la empresa en la América Latina. Caracas: IESA.
- Gil Gaytán, O. (2017). La logística: clave para la competitividad global de las pequeñas y medianas empresas del estado de Jalisco México. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 6(11), 1-23.
- Goto, M., Okumura, K., & Nakagawa, S. (2018). Nuclear and thermal feasibility of lithium-loaded high temperature gascooled reactor for tritium production for fusion reactors. *Fusion Eng. Des*, 136, 357.
- Granillo Macías, R., González Hernández, I., & Santana Robles, F. (2019). Operadores Logísticos. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior de Cd. Sahagún*(11), 45-48. Retrieved from <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/sahagun/issue/archive>
- Gu, H., Guo, T., & Wen, H. (2020). Leaching efficiency of sulfuric acid on selective lithium leachability from bauxitic claystone. *Miner Eng*, 145.
- H.O.F. Batteries. (2004). Handbook of batteries, Cell. D.E. Library.
- Herrera Pérez, G., Pérez Zúñiga, G., Verde Gómez, Y., Valenzuela Muñiz, A., & Vargas Bernal, R. (n.d.). Anodic ZnO-Graphene Composite Materials in Lithium Batteries. *IntechOpen*, 1-22. doi:http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86169
- Industria Química. (2022). Almacenamiento y transporte seguro de baterías de litio. *Industria Química*.
- Isaza, J. (2008). Cadenas productivas. Enfoques y precisiones conceptuales. *Sotavento MBA*, 11, 8-25. Retrieved from <http://revistas.uexternado.edu.co/index.php/sotavento/article/viewFile/160/2/1441>
- Jagadale, A., Zhou, X., Xiong, R., Dubal, D., Xu, J., & Yang, S. (2019). Lithium ion capacitors (LICs): development of the materials. *Energy Storage Mater*, 19, 314-329.
- Kangyu, Z., Peng, C., Xiaoyu, C., Guoqiang, Z., Hongshuai, H., & Xiaobo, J. (2020). Carbon materials for high-performance lithium-ion capacitor.

- ScienceDirect. Elsevier, 21, 21-39.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.coolec.2020.01.005>
- Karl, T., & Trenberth, K. (2003). Modern Global Climate Change. *Science*, 80(302), 1719-1723. doi:10.1126/science.1090228
- Liu, Y., Baozhong, M., Yingwei, L., Chengyan, W., & Yongqiang, C. (2023). A review of lithium extraction from natural resources. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. Springer, 30(2), 209-224. doi:<https://doi.org/10.1007/s12613-022-2544-y>
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J., & Luo, X. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl. Energy*, 137, 511-536. doi:doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081
- Marasco, A. (2007). Third - party logistics: A literature review. *International Journal of Production Economics*(113), 127-147. doi:10.1016/j.ijpe.2007.05.017
- Martínez Arroyo, J. (2019). La gestión de la cadena de valor en un entorno competitivo y cambiante. *SIGNOS*, 11(1), 55-70.
- Meier, P., Wilson, P., Kulcinski, G., & Denholm, P. (2005). *Energy Policy*. 33.
- Molander, P. (2014). Public procurement in the european union: the case for national threshold values. *Journal of Public Procurement*, 14(2), 181-214.
- Molina, M. (2017). Energy storage and power electronics technologies: A strong combination to empower the transformation to smart grid. *Proc. IEEE*, 105(11), 2191-2219. doi:10.1109/JPROC.2017.2702627
- Mu, Y. X., Zhang, C. Y., Zhang, W., & Wang, Y. (2021). Electrochemical lithium recovery from brine with high $[\text{Mg}]^{2+}/[\text{Li}]^{+}$ ratio using mesoporous $\lambda\text{-MnO}_2/\text{Li}_2\text{Mn}_2\text{O}_4$ modified 3D graphite felt electrodes. *Desalination*, 511.
- Quintero, J., & Sánchez, J. (2006). La cadena de valor: Una herramienta del pensamiento estratégico. *Telos*, 8(3), 377-389. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99318788001>
- Rosero García, J., García Sierra, R., Felipe Cerón, A., & Felipe Zuñiga, A. (2022). Una propuesta metodológica para la evaluación de la condición en sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) utilizando KPIs. *Ingeniería y desarrollo*, 40(2), 204-223. doi:[dx.doi.org/10.14482/inde.40.02.627.001](https://doi.org/10.14482/inde.40.02.627.001)
- Song, J., Wang, Y., & Wang, C. (1999). *Power Sources*. 73(183).
- Ströbele Gregor, J. (2012). Litio en Bolivia. El plan gubernamental de producción e industrialización del litio, escenarios de conflictos sociales y ecológicos, dimensiones de desigualdad social. Chile: Fundación Heinrich Böll.
- Tapia, C., Oliver Tolentino, M., González, I., & Ramos Sánchez, G. (2019). Premio Nobel de Química 2019: Baterías de ion-Litio. *Educación Química*, 31(1), 12-22. doi:10.22201/fq.18708404.e.2020.1.72730
- Valencia Giraldo, A. (2016). La era del litio. *Revista Colombiana de Materiales*(9), 1-14.
- Valles Romero, J., & Ortiz, G. (2011). Logística en la economía mundial. *Revista Académica de Economía*(156). Retrieved from <https://www.eumed.net/coursecon/ecolat/mx/2011/vrgo.html>
- Vásquez Cordano, A. (2018). El mercado del litio y la revolución de las energías renovables. Perú: Escuela de Posgrados GÉRENS.
- Villaescusa Leal, R. (2017). Análisis de la composición de ánodos de zinc para una descarga eficiente en baterías de Zn-aire. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
- Wu, T., Zhang, C., Zou, G., Hu, J., Zhu, L., Cao, X., . . . Ji, X. (2019). The bond evolution mechanism of covalent sulfurized carbon during electrochemical sodium storage process. *Sci China Mater*, 62, 1127-1138.
- Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlenius, J. (2010). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles. *Critical issues. J. Clean. Prod.*, 18, 1519-1529.
- Zhang, H., Li, C., Piszcz, M., Coya, E., Rojo, T., Rodríguez Martínez, L., . . . Zhou, Z. (2017). Single lithium-ion conducting solid polymer electrolytes: advances and perspectives. *Chem. Soc.*(46), 797-815. doi:doi.org/10.1039/C6CS00491A
- Zhenguo, Y., Jianlu, Z., Kinter-Meyer, M., Xianochuan Lu, Daiwon Choi, Lemmon, J., & Jun Liu. (2010). Electrochemical energy storage for green grid. *Chemical reviews*, 1-43. doi:doi.org/10.1021/cr100290v
- Zuluaga Mazo, A., Guisao Giraldo, É., & Molna Parra, P. (2011). La evaluación de proveedores en la gestión del abastecimiento en las empresas del sector textil, confección, diseño y moda en Colombia. *Revista Politécnica*, 7(13), 79-89.