La problemática actual de las baterías para vehículos eléctricos

“Se estima que existen en circulación unos veinte millones de coches eléctricos puros, lo cual ha duplicado la cifra de hace unos pocos años.”

Ana Elduque y Juanjo Ortega

unsplash

unsplash

La nueva movilidad exige nuevos vehículos propulsados de una forma diferente. La reducción de la emisión de gases de efecto invernadero y la necesidad de mejorar la calidad del aire urbano llevan a ello. Solo en la Unión Europea, los vehículos de pasajeros producen el 12% de las emisiones de CO_2. Algunos estados han establecido fechas a partir de las cuales ya no se podrán fabricar coches de combustión interna*.

Los VE desarrollados hasta la fecha se agrupan en cinco grandes tipos.

- Híbrido asistido, MHEV (*Mild Hybrid Electric Vehicle*). El coche dispone de motor de combustión interna y de un motor eléctrico auxiliar. La batería no puede conectarse a la red eléctrica ni se puede funcionar 100% en modo eléctrico.
- Híbrido, HEV (*Hybrid Electric Vehicle*). Intercala un motor eléctrico para asistir al motor de combustión. Puede moverse en modo 100% eléctrico, pero su autonomía es limitada.
- Híbrido enchufable, PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*). Tiene un motor de combustión acompañado de uno o varios motores eléctricos que pueden usarse de manera independiente o en conjunto. Las recargas se hacen mediante conexión a la red.
- Eléctrico de baterías, BEV (*Battery Electric Vehicle*). El motor eléctrico que propulsa el coche obtiene la energía de sus baterías. La recarga se realiza por conexión a la red.
- Eléctrico de celdas de combustible, FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*). Los coches de pila de hidrógeno generan electricidad según la reacción $H_2(g) + ½O_2(g) \longrightarrow H_2O(g) + E$. El problema es la dificultad del manejo del hidrógeno (temperaturas muy bajas y altas presiones). Los sistemas de generación de hidrógeno in situ producen emisiones (conversión de metanol, CH_3OH, a CO_2 e H_2).

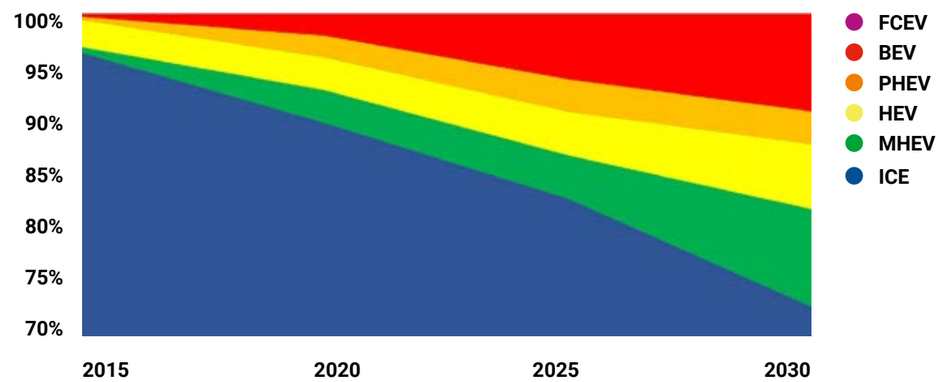
La cuota de mercado de los vehículos eléctricos es baja, pero se esperan fuertes incrementos en el número de unidades en circulación, excepto en el caso de los FCEV, cuya cuota no se estima que supere el 1% en el año 2030 por ser la tecnología menos desarrollada hasta el momento. En la figura 1 se muestra una posible evolución de las cuotas de mercado hasta el año 2030 según el tipo de vehículo.

Los vehículos eléctricos están en desarrollo y todos ellos se enfrentan al problema del almacenamiento de energía, lo que es equivalente a autonomía. Una batería convencional de plomo (plomo-ácido) tiene unos valores de densidad de energía por debajo de 100 Wh/l y una energía específica menor de 50 Wh/kg. En el caso de las baterías de ion-Li, las más utilizadas en VE, estos

* Una versión ampliada de este artículo puede consultarse en: "Una aproximación al vehículo eléctrico desde la química." Ana Isabel Elduque, Juan José Ortega. Revista Economía Aragonesa, número 79, página 97, julio 2023

"Una batería es un dispositivo que almacena la electricidad en forma de energía química y que es capaz de suministrarla a demanda de una forma controlada."

Figura 1: evolución prevista hasta 2030 de la cuota de mercado de los vehículos eléctricos.



ICE: vehículos de combustión interna – Internal Combustion Engine

valores superan *fácilmente* los 200 Wh/l y 125 Wh/kg. Esto se traduce en que, para una determinada cantidad de energía, tanto el volumen como la masa a transportar en un vehículo es mucho menor si se utilizan baterías de ion-Li. Lo que ocurre es que mientras en un VE el 100% de la energía debe estar almacenada en la batería, en un vehículo de combustión interna la energía se almacena y se transporta en el tanque de combustible. En el caso de la gasolina, su densidad de energía es de 35 MJ/l (9.700 Wh/l), lo cual permite que, a pesar del bajo rendimiento de un motor de combustión interna (20-25%), un tanque de combustible convencional permita una autonomía al vehículo muy superior a la proporcionada por una batería. Además, la recarga de combustible apenas supone unos minutos, mientras que las mejores baterías del mercado no pueden llegar a este tiempo.

Por tanto, los VE se enfrentan a unos retos tecnológicos propios que deben ser superados. En la figura 2 se resume, según el tipo de VE, los que se han identificado como más significativos.

El desarrollo del VE es muy amplio y abarca muchos frentes, todos del máximo interés, pero trataremos aquí las áreas relacionadas con el desarrollo de las nuevas baterías, ya que es una de las temáticas de mayor cercanía al mundo de la química.

BATERÍAS

Las baterías son el almacén de energía y la fuente de alimentación del motor impulsor. Las baterías convencionales de plomo no eran susceptibles de convertirse en los suministradores de energía ya que los VE hubieran debido incorporar más de una tonelada de baterías para poder disponer de una autonomía mínima. El aligeramiento del peso es un factor clave para poder obtener un mayor rendimiento de la energía consumida.

Una batería es un dispositivo que almacena la electricidad en forma de energía química y que es capaz de suministrarla a demanda de una forma controlada. Cuando se invierte el proceso, una batería es capaz de convertir la energía recibida en el proceso de recarga en forma de energía química y poder continuar así un nuevo ciclo.

Figura 2: retos tecnológicos actuales según el tipo de VE.

TIPO DE VE	RETOS TECNOLÓGICOS
Híbridos asistidos MHEV Mild Hybrid Electric Vehicle	• Desarrollo de baterías de 48 V
Híbridos HEV Hybrid Electric Vehicle	• Almacenamiento de energía • Motores eléctricos más eficientes • Electrónica de potencia
Híbridos enchufables PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle	• Almacenamiento de energía • Motores eléctricos más eficientes • Electrónica de potencia • Infraestructura de recarga eléctrica
Eléctrico de baterías BEV Battery Electric Vehicle	• Almacenamiento de energía • Motores eléctricos más eficientes • Electrónica de potencia • Infraestructura de recarga eléctrica
De celdas de combustible FCEV Fuel Cell Electric Vehicle	• Tecnología de fabricación de celdas de combustible • Almacenamiento de energía • Infraestructura de recarga de combustible

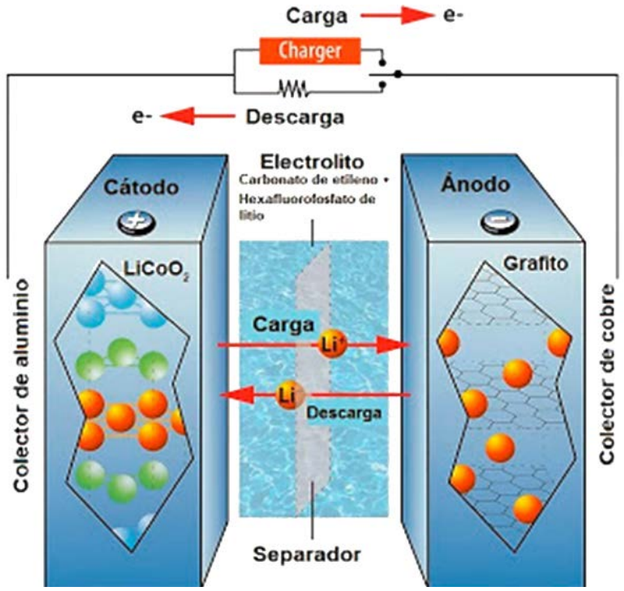


Figura 3: esquema de una celda de una batería de ion-Li.

"Mientras que las baterías convencionales de plomo suministran la energía a 12 V, las baterías de VE no están tan estandarizadas."

Las baterías están compuestas por unidades electroquímicas, llamadas celdas, en las que se producen las reacciones redox que ponen en movimiento el flujo de electrones hacia el motor-consumidor (descarga) o para recibirlos procedentes de la red (carga) y almacenarlos en forma de componentes químicos. En la figura 3 se muestra el esquema de una celda de una batería de Li. El voltaje de la celda viene determinado por la electroquímica del proceso. Como el consumidor puede necesitar la energía con otras características que la producida directamente por la celda (fundamentalmente el voltaje), se conectarán varias celdas hasta formar un conjunto que la proporcione en la forma conveniente. Este conjunto de celdas conectadas que almacenan y suministran la energía a un determinado voltaje y a un ritmo específico es a lo que propiamente llamamos batería.

Las de uso más frecuente tienen un voltaje de celda de 3,7 V. Mientras que las baterías convencionales de plomo suministran la energía a 12 V, las baterías de VE no están tan estandarizadas y existen muchos modelos con diferentes voltajes de descarga. Lo más frecuente es que oscilen entre 12 y 72 V, lo que significa que las

unsplash

baterías están compuestas por un número de celdas no estandarizado, en función del tipo de VE, del fabricante y de las prestaciones del coche.

Una celda de ion-Li está compuesta por tres elementos fundamentales:

- Ánodo. Bien cede electrones al circuito exterior, que los llevará al motor eléctrico (descarga), bien los recibe de la red exterior (carga). Suele estar formado por un colector de grafito, aunque también suelen emplearse algunas aleaciones metálicas.
- Cátodo. Es la otra parte de la celda y hace la función inversa del ánodo. Suele estar formado por compuestos complejos de Li.
- Electrolito. Es el cierre interior del circuito eléctrico, junto con el conexionado exterior, cierre externo. Es un conductor iónico pero aislante electrónico (permite que fluyan a su través iones Li^+, pero no electrones e^-). Está formado por una disolución con una sal de Li disuelta en ella.

En descarga se produce un bombeo de electrones desde la celda, mientras que en carga una fuente exterior (red eléctrica → cargador) suministra los electrones a la celda. El funcionamiento requiere que este movimiento de cargas eléctricas se compense, que es lo que ocurre a través del electrolito con el flujo de iones Li^+.

Existen otros problemas adicionales que hay que mejorar para que el VE alcance las prestaciones de un vehículo de combustión interna.

El primero es la duración de la batería. Las baterías de plomo suelen tener una vida de algo más de 1.000 ciclos, es decir, pueden descargarse y volverse a cargar más de 1.000 veces. La carga de estas baterías se hace durante la conducción, es el alternador del coche el encargado de recargarla, y por ello no somos conscientes de ello. En el caso del VE esto es diferente. Los VE que no son enchufables, MHEV y HEV, la carga de la batería se hace de forma similar a un vehículo convencional, incorporándose dispositivos para ayudar a la carga de la batería durante la conducción, como son los frenos regenerativos (aprovechan la reducción de la energía cinética durante las frenadas para recargar la batería). Con respecto a los vehículos enchufables, PHEV y BEV, es imprescindible que la batería permita un número muy elevado de recargas de calidad, ya que es la única fuente de energía. Actualmente, las baterías de Li ya están ofreciendo vidas de más de 3.000 ciclos. Esta vida supone que, en modos de conducción promedio, una batería de Li puede tener una duración equivalente a dos baterías de plomo, habiendo llenado el depósito de combustible unas 200 veces. Aunque las cifras de ciclos de vida de las baterías de Li parecen muy prometedoras, es imprescindible mejorarlas. Para evitar un consumo elevado en regímenes de funcionamiento alejados del óptimo, conducción urbana, por ejemplo, se instalan sistemas electrónicos de gestión de la energía.

> “En modos de conducción promedio, una batería de Li puede tener una duración equivalente a dos baterías de plomo, habiendo llenado el depósito de combustible unas 200 veces.”

El segundo aspecto técnico que afecta al funcionamiento de las baterías es la capacidad de recarga. Las reacciones químicas implicadas parece que pueden llevarse a cabo de forma indefinida en la dirección deseada (carga o descarga) cambiando las condiciones. La realidad es que estos procesos no son absolutamente reversibles. En cada ciclo de carga y descarga se producen reacciones químicas simultáneas que reducen la capacidad de la batería. En estas reacciones, los elementos activos (ánodo y cátodo) van sufriendo un proceso de envejecimiento que reduce su capacidad conductora y el electrolito va transformando su estructura interna, lo que altera la movilidad de los iones. Conforme se dificultan las reacciones electrolíticas, se transforma cada vez más energía en calor, en detrimento de energía eléctrica, lo que acelera la degradación de los elementos de la batería y reduce la energía que es posible almacenar en cada ciclo. Tras un tiempo es necesario sustituir la batería por otra nueva. En el mantenimiento de la capacidad de carga, un factor muy importante es el tiempo dedicado a la misma. Al principio del desarrollo de las baterías se requerían tiempos muy largos, de hasta 8 horas, lo cual limita el uso interurbano del VE. La necesidad de un mínimo de tiempo de carga se debe a que la energía que se suministra desde el dispositivo cargador no debe superar un determinado umbral, ya que por encima de este las reacciones químicas paralelas se aceleran y ponen en peligro la integridad de la batería. Hoy en día existen en el mercado baterías que permiten recargar el 50% de la capacidad de la batería en 30 minutos, reduciéndose a 80 minutos el tiempo necesario para una carga completa. Este aspecto precisa investigación tanto en la electroquímica del proceso como en la infraestructura de recarga.

FABRICACIÓN DE BATERÍAS PARA EV

Una cuestión crucial en el desarrollo del VE es la fabricación de un número de baterías mucho mayor que el actual. En el año 2022 se produjeron baterías con una

capacidad de almacenamiento por valor de 493 GWh, mientras que en 2023 se estima que esta cifra ha alcanzado casi 650 GWh. Lo primero que hay que decir es el enorme desequilibrio que existe en la manufactura de baterías si se compara con la de vehículos en general. En la figura 4 se muestra la cuota de mercado prevista de los principales fabricantes durante el año 2023. Hay que señalar que casi el 95% de las baterías fueron fabricadas en Asia, y más concretamente en China, Corea y Japón, entre diez compañías. Esta concentración no es ajena al enorme desarrollo y dominio de las TIC en estos países, y haber sido los pioneros en el fomento de los VE con importantes apoyos gubernamentales.

En los últimos tiempos parece que se ha despertado el interés en Europa y EE.UU. para disponer de un sector propio de fabricación de baterías, pero basado en nuevas tecnologías. El interés por desarrollar baterías basadas en otra electroquímica procede de la necesidad de reducir la cantidad de materias primas necesarias para un mercado que se pretende que sea decenas de veces mayor que el actual.

"Una cuestión crucial en el desarrollo del VE es la fabricación de un número de baterías mucho mayor que el actual."

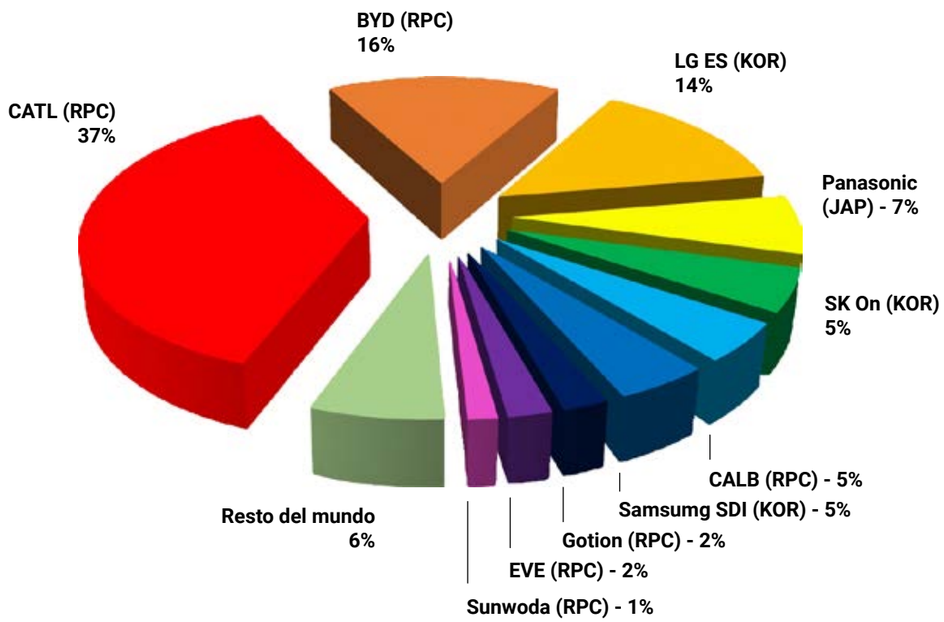


Figura 4: cuota de mercado en 2023 de los principales fabricantes de baterías para VE.

EL SECTOR DE AHORA EN ADELANTE

Típicamente un VE promedio equipado con una batería de ion-Li contiene unos 8 kg de litio, 35 kg de níquel, 20 kg de manganeso y 14 kg de cobalto (fuente: *Argonne National Laboratory*).

El litio en sí mismo no es un recurso escaso. Lo que sí se espera es que, al menos hasta el 2030, pueda haber suministros irregulares y oscilaciones en precios debido a la insuficiencia de capacidad de producción, si no se producen cambios de tecnología que reduzcan el consumo de litio y, sobre todo, que el reciclado de las baterías de VE proporcione un litio más caro que el obtenido directamente de mina, como ocurre hoy, lo que desincentiva el reciclaje como fuente de suministro. Las actuales reservas declaradas de 21 millones de toneladas (Fuente: *US Geological Survey*) solo corresponden a las que, a los precios actuales, son rentables de obtener.

Los temores de cortes de suministro proceden de otros metales, en especial el cobalto. El cátodo de las actuales baterías está formado por un óxido doble de litio y cobalto, de composición $LiCoO_2$. Dos terceras partes de las menas de cobalto se producen en la República Democrática del Congo y están incluidas en el listado de *Conflict Minerals*, pues su extracción incumple normativas internacionales sobre derechos laborales, regulación medioambiental y financiera. Si el laboreo de los minerales de cobalto se llevara a cabo de forma correcta, es muy difícil predecir el precio del metal en los mercados internacionales. La solución que se está buscando a este problema es la sustitución del cobalto por níquel que, aunque sigue siendo un metal de elevado precio, no presenta tantos problemas para su obtención.

También se está trabajando en otras líneas para conseguir mejoras en los rendimientos de las baterías. Una de estas líneas es facilitar las operaciones de desensamblado y reciclado para que los materiales obtenidos sean más competitivos que los de primera fabricación.

Otra línea de trabajo se basa en que los procesos electroquímicos tienen lugar fundamentalmente en la superficie de los elementos activos. Se están desarrollando tratamientos superficiales para ánodos y cátodos que, por un lado, mejoran la eficiencia de la transformación electroquímica y, por otro, alargan la vida de la batería.

Hasta el año 2025 no se espera que se produzcan transformaciones radicales, baterías con otra electroquímica,

EVOLUCIÓN DE LAS BATERÍAS PARA EV		
TIPO DE BATERÍA	PUESTA EN OPERACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Baterías de ion-Li convencionales	Anterior a 2010	• Elevado coste • Poca capacidad de almacenamiento de energía
Baterías de ion-Li de 2ª generación	2015	• Cátodos de nuevo diseño • Mayor voltaje y capacidad
Baterías de ion-Li de 3ª generación	2022	• Ánodos de aleaciones metálicas y composites • Electrolitos sólidos de composites poliméricos • Mayor voltaje
Baterías con química diferente • Li metálico sólido • Li-aire • Zn-aire • Ion-Mg	A partir de 2025	• Densidad de energía de 3 a 5 veces superior

Figura 5: evolución tecnológica de las baterías de VE hasta el año 2025.

pero ello no es óbice para que las baterías fabricadas hasta hoy no vayan a sufrir cambios muy importantes. En la figura 5 se muestra la evolución que han tenido las baterías.

Como se aprecia en la tabla, a medio plazo se piensa en la introducción de baterías en las que el litio no sea el metal activo principal, lo cual también reduce las necesidades de cobalto.

Si miramos más allá del periodo 2025-2030, las investigaciones que se están llevando a cabo parecen salidas de relatos de ciencia ficción, pero alguna de ellas se convertirá en realidad. Prácticamente todas las investigaciones se centran en aumentar la capacidad de almacenamiento, alargar la vida, reducir o eliminar la necesidad de metales escasos y facilitar la reciclabilidad. Existe una pléyade de investigaciones en marcha, pero hay algunas líneas de trabajo que merece la pena destacar.

- Fabricación de elementos activos con metales más comunes (níquel y aluminio).
- Ánodos de fibra de carbono más efectivos que de grafito.
- Nanotubos de carbono y micropartículas mesoporosas de silicio, para aumentar la capacidad y reducir los tiempos de carga.

“En la actualidad, el reciclado de baterías se enfrenta a un hecho que excede el campo tecnológico.”

- Uso de compuestos orgánicos, péptidos, que permiten cargas muy rápidas.
- Nanoconexiones de oro para baterías con una vida de hasta 20.000 ciclos.
- Uso de sulfuros superiónicos para baterías con electrolitos de estado sólido de carga ultrarrápida.
- Baterías de cinc-aire incombustibles.
- Uso de grafeno para electrolitos.
- Baterías de aluminio-aire con autonomía para más de 1.000 millas.
- Recarga sin conexión. La carga wireless es vista como una manera de minimizar los tiempos de carga ya que esta podría hacerse durante la conducción.

RECICLADO DE BATERÍAS

En la actualidad, el reciclado de baterías se enfrenta a un hecho que excede el campo tecnológico. Hemos comentado anteriormente que el cobalto puede ser el metal crítico en la fabricación de baterías para VE, por lo que se investiga en nuevos productos que no necesiten este elemento. Pero de aquí surge la paradoja. Hoy en día la mayoría del retorno económico de los procesos de reciclado de baterías de ion-Li procede de la recuperación de cobalto. Si este desaparece en los nuevos diseños, el incentivo para el reciclado de baterías no existirá, ya que, a los precios actuales, el litio es más barato si procede de mina que si su origen es el reciclado. Una de las líneas de investigación que más se está desarrollando es precisamente que el proceso de reciclado tenga interés económico por la recuperación del litio.

En la figura 6 se esquematiza el proceso de reciclado de baterías para VE. Hoy en día la mayor capacidad de reciclado reside en los propios fabricantes de baterías por lo que se da una concentración muy similar en capacidad de reciclado que la mostrada para la capacidad de producción.

Figura 6: proceso de reciclado de baterías de Li.

Ya se ha comentado con anterioridad que uno de los principios de la economía circular es alargar la vida útil de los productos, para reducir la necesidad de otros nuevos. Esta línea de pensamiento es la que tienen muchas investigaciones: reducir la necesidad de metales escasos dado que las nuevas baterías para VE tendrán una duración mucho mayor que las actuales.

También se están desarrollando baterías más fáciles de desmontar, incluyendo la posibilidad de que se puedan llegar a separar fácilmente las celdas individuales que constituyen la batería. Esta separación previa reduciría la agresividad de la etapa de fragmentación y facilitaría los tratamientos químicos de recuperación.

CONCLUSIÓN

El VE ha venido para quedarse y las cifras así lo demuestran. En el año 2023 el 18% de las nuevas matriculaciones a nivel mundial corresponden a vehículos que incorporan alguna conducción en modo eléctrico. Se estima que existen en circulación unos veinte millones de coches eléctricos puros, lo cual ha duplicado la cifra de hace unos pocos años. Los actuales modelos existentes son solo eslabones de una cadena de desarrollo tecnológico en la que todavía no se vislumbra el final. Durante estos años de graves crisis geoestratégicas, los componentes de los VE han reducido su coste de fabricación de forma sostenida (ver figura 7), lo cual facilita su introducción en el mercado. Los primeros pasos ya están en marcha y todos los involucrados en tareas de investigación y desarrollo debemos sentirnos implicados y concernidos en que este camino sea lo más corto posible.

Ana Elduque
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza
Colegio Oficial de Químicos de Aragón y Navarra

Juanjo Ortega
Colegio Oficial de Químicos de Aragón y Navarra

“Uno de los principios de la economía circular es alargar la vida útil de los productos, para reducir la necesidad de otros nuevos.”

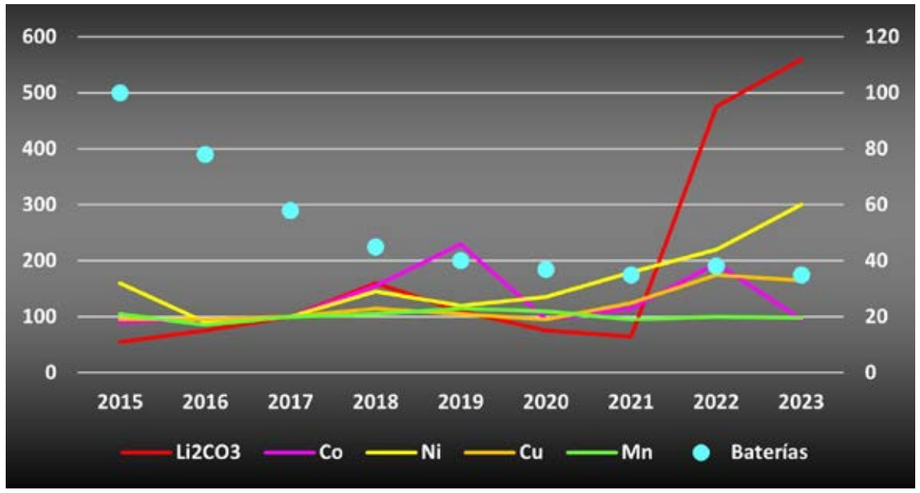


Figura 7: índices de precios de metales y baterías. Todos los precios de los metales están referenciados al año 2017 (índice 100), escala izquierda, mientras que el de baterías está referenciado al año 2015 (índice 100), escala de la derecha.

unsplash

BIBLIOGRAFÍA

- Future Fuels Strategy. Department of Industry, Science, Energy and Resources. Government of Australia. 2021.
- Alternative Vehicle Propulsion Systems: The Future of Automotive Tech. https://www.mentorworks.ca/blog/business-strategy/vehicle-propulsion-systems/
- Electric vehicle batteries: what will they look like in the future? https://theconversation.com/electric-vehicle-batteries-what-will-they-look-like-in-the-future-164263
- The future of EV batteries. https://www.greencars.com/guides/the-future-of-ev-batteries
- 5 charts explaining the future of EV batteries. https://www.morningbrew.com/emerging-tech/stories/2021/10/28/5-charts-explaining-the-future-of-ev-batteries-the-backbone-of-the-electric-transition
- Electric cars and batteries: how will the world produce enough? https://www.nature.com/articles/d41586-021-02222-1
- Solid-State Batteries Promise Electric Car Popularity Boost, But Technical Mountains Await. https://www.forbes.com/sites/neilwinton/2021/11/28/solid-state-batteries-promise-electric-car-popularity-boost-but-technical-mountains-await/?sh=5ca4412d632f
- Next-generation battery may unlock the future for electric vehicles. https://www.ocregister.com/2021/06/18/next-generation-battery-may-unlock-electric-vehicles-future/
- Creating next generation batteries for electric vehicles. https://www.ukri.org/news/creating-next-generation-batteries-for-electric-vehicles/
- Ranked: The Top 10 EV Battery Manufacturers. https://elements.visualcapitalist.com/ranked-top-10-ev-battery-makers/
- Alternative Fuels. US Department of Energy. https://afdc.energy.gov/fuels/
- Fuel Cells. US Department of Energy. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells