

# Futuro energético sostenible: el potencial de los óxidos metálicos

Alberto E. Molina<sup>a</sup>; Cristian E. Cortés<sup>a</sup>; Lina M. Aristizábal<sup>a</sup>; Manuela S. Páez<sup>a</sup>; Lina K. La Rotta<sup>a</sup>; Julián D. Ocampo<sup>a</sup>; Sergio E. Reyes<sup>b</sup>; Pablo Ortiz<sup>b</sup>; María Teresa Cortés<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Integrantes del Grupo de Electroquímica

Departamento de Química, Universidad de los Andes

<sup>b</sup> Integrantes del Grupo de Diseño de Productos y Procesos

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de los Andes

Para afrontar los retos asociados a la creciente demanda de servicios en los sectores de las comunicaciones, energía, salud, transporte y muchos más, las ciencias y la ingenierías buscan permanentemente soluciones que satisfagan los requerimientos técnicos sin comprometer los factores económicos y ambientales. En particular, en las últimas décadas, la tecnología ha evolucionado hacia alternativas que reduzcan los impactos ambientales, no solo durante la etapa de vida útil de los productos, sino también en los procesos de extracción de materias primas, la manufactura y ensamblaje y la etapa de disposición final.



Parque eólico. Fotografía por: Freepik.





Mineral. Fotografía por: Freepik.

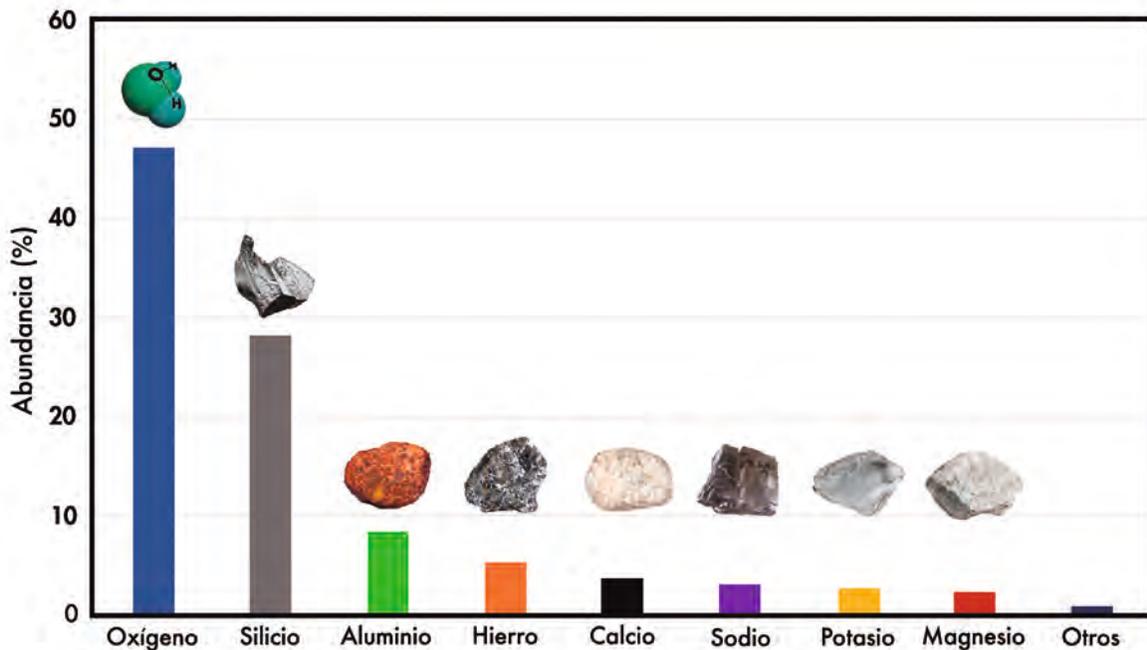
En este contexto, la investigación en nuevos materiales se ha intensificado y, en especial, se destaca el potencial que tienen los óxidos de metales de transición. Si bien estos óxidos se conocen desde hace mucho tiempo, sus modificaciones en composición y la obtención de diversas nanoestructuras los hacen fundamentales en dispositivos y sistemas tanto convencionales como en desarrollo. En este artículo se destacan y explican algunas de las aplicaciones más importantes de los óxidos metálicos.



## Introducción

El crecimiento constante de la población mundial no solo aumenta la demanda de energía para realizar nuestras actividades diarias, sino que también incrementa la producción de desechos que deterioran el medio ambiente. Por ejemplo, constantemente buscamos que nuestros dispositivos electrónicos, como nuestros celulares, computadoras y electrodomésticos, sean más eficientes energéticamente y se carguen más rápido, lo cual puede llevar a que su uso sea más productivo. No obstante, al final de su vida útil, estos dispositivos son típicamente desechados sin considerar otras opciones de aprovechamiento, por lo que al llegar a los centros de residuos, comienzan a descomponerse y liberan en la biosfera una gran cantidad de metales tóxicos como el plomo, el cadmio, el mercurio y el cromo, así como material lixiviado (parte soluble de un sólido) y particulado. Esta fuente de contaminación metálica causa múltiples y graves daños, como la contaminación del agua y la tierra, la bioacumulación en organismos vivos y, en última instancia, riesgos para la salud humana y la vida silvestre.

**Tranvía. Fotografía por: Freepik.**



Gráfica 1. Elementos más abundantes en la corteza terrestre [2].

No obstante, es una fortuna que nuestro planeta nos proporcione sustancias que permiten desarrollar tecnologías de producción de energía sin las problemáticas mencionadas e, incluso, que nos posibilite métodos para descontaminar el medio ambiente. Estamos hablando de una amplia gama de metales combinados con oxígeno, conocidos como óxidos metálicos, inocuos para el medio ambiente y la vida humana, y que se encuentran en abundancia en el interior de la Tierra (ver gráfica 1). Por ejemplo, el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) se utiliza para obtener el silicio (Si), requerido en la fabricación de celdas solares, las cuales actualmente representan una de las mejores alternativas para generar energía en zonas de difícil acceso [1]. Otro ejemplo es el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que puede emplearse en el almacenamiento y la producción de energía, debido a sus propiedades eléctricas y a su alta resistencia térmica.

También encontramos el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que pueden romper los enlaces químicos de contaminantes en el agua, y degradarlos hasta convertirlos en sustancias inocuas. Así, los óxidos metálicos disponibles en la naturaleza, o los obtenidos mediante síntesis química, poseen propiedades útiles para desarrollar tecnologías que mejoren la calidad de vida humana, al abordar desafíos como la descontaminación, la producción y el almacenamiento de energía.

En este artículo se presentan las características más importantes de algunas de las principales tecnologías encaminadas a la producción y almacenamiento de energía limpia, y a la descontaminación del medio ambiente, las cuales están basadas en las propiedades de óxidos metálicos de baja toxicidad.

## Características generales de los óxidos metálicos

Los óxidos metálicos se destacan por diversas características que los convierten en materiales importantes para numerosas aplicaciones. Son sustancias en estado sólido en las que el metal está unido al oxígeno y forma un enlace iónico, debido a que el metal tiene carga positiva (catión) y el oxígeno carga negativa (anión), por lo que la atracción de cargas eléctricas opuestas los mantiene fuertemente unidos. Este tipo de enlace ocasiona que los átomos se estructuren en arreglos cristalinos, ordenados en posiciones fijas. A partir de esta estructura ordenada y paramétrica, y de la configuración electrónica de los átomos (disposición de electrones en los niveles de energía) surgen las interesantes características de estos compuestos. Entre las más destacadas están sus propiedades químicas, asociadas a que exhiben múltiples estados de oxidación, lo que les confiere una notable reactividad. También tienen propiedades físicas diversas, como la conductividad eléctrica, que puede variar ampliamente, desde semiconductores (como el óxido de estaño) hasta aislantes (por ejemplo, el óxido de silicio). Y, en cuanto a sus propiedades ópticas, los óxidos pueden absorber, reflejar y transmitir la luz. Además, poseen una gran estabilidad térmica, lo que les permite conservar sus propiedades a altas temperaturas.

Por otro lado, algunos óxidos metálicos son abundantes y de fácil extracción de la fuente o de sencilla síntesis química, lo que los convierte en opciones económicamente viables para aplicaciones tecnológicas. Además, muchos óxidos metálicos presentan baja toxicidad para el medio ambiente y la salud humana debido a los bajos niveles de bioacumulación y de efectos ecotoxicológicos.



Imán. Fotografía por: Freepik.

## Tecnologías basadas en óxidos metálicos no contaminantes



Paneles solares. Fotografía por: Freepik.

### **Celdas solares**

La evolución de la tecnología solar ha sido un viaje de altibajos, desde las primitivas celdas solares de cloruro de plata en el siglo XIX hasta las sofisticadas celdas de silicio de la era contemporánea. Es claro que la tecnología fotovoltaica basada en silicio (Si) ha sido decisiva en el desarrollo de las celdas solares funcionales actuales y futuras. Este elemento químico se conoce desde tiempos antiguos por su presencia en minerales como la arena o el cuarzo; no obstante, no fue sino hasta 1954 que se fabricó la primera celda solar basada en Si en los Laboratorios Bell. Con este primer dispositivo de eficiencia del 6%, se encendió el interés por aprovechar el efecto fotovoltaico para desarrollar fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles y a la energía nuclear. El efecto fotovoltaico es el proceso mediante el cual un material semiconductor, como el Si, genera corriente cuando se expone a la luz y es el mecanismo mediante el cual se genera energía en una celda solar.

A partir de este hito, la carrera ha sido imparable pero tortuosa, en gran medida por la necesidad de obtener el Si en un alto grado de pureza a partir del óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Las propiedades del  $\text{SiO}_2$  son las que hacen tan desafiante obtener el Si puro. Por ejemplo, el óxido tiene un alto punto de fusión (se requieren altas temperaturas para obtenerlo en forma fundida), su estabilidad es altísima (es muy difícil romper el enlace químico entre el Si y el O) y, por tanto, muy baja su reactividad química. No obstante, las ventajas del  $\text{SiO}_2$  son sustanciales, principalmente porque es uno de los óxidos más abundantes en la corteza terrestre, biocompatible y no tóxico, lo cual lo convierte en una fuente inmejorable del Si: uno de los mejores y más asequibles materiales semiconductores.

A raíz de los desafíos tecnológicos y económicos de obtener el Si puro a partir del  $\text{SiO}_2$ , se han investigado diversos materiales para complementar los dispositivos solares basados en Si. Así, en las últimas décadas, se ha presentado un fenómeno revolucionario en la industria fotovoltaica: la emergencia y rápido avance de las celdas solares de perovskita (PSC) [2]. Las PSC se han convertido en una alternativa prometedora a las celdas solares de Si debido a su alta eficiencia de conversión de energía y a la reducción de costos en materias primas y en su manufactura. A diferencia de las celdas de silicio, las PSC se basan principalmente en materiales tipo perovskita, los cuales reciben ese nombre por presentar estructuras tipo  $\text{ABX}_3$  (por ejemplo,  $\text{MAPbI}_3$  [yoduro de plomo y metilamonio] o  $\text{CsPbI}_3$ ), que ofrecen una alta absorción de la luz solar y generan corriente con alta eficiencia [3].

Una característica distintiva de las celdas solares es que presentan varias capas de materiales, cada una con distintas funciones, como absorber luz y transportar las distintas partículas que producen la corriente. Las PSC no son la excepción, y una de las capas que comprenden es la de un material que se conoce como «capa transportadora de huecos» (*Hole-Transporting Layers [HTL]* en inglés). Un hueco es una ausencia de un electrón y su desplazamiento también causa corriente eléctrica [3]. Otra capa es la del material absorbente de la luz (perovskita) y, una tercera, es una capa de un material que transporta electrones (*Electron-Transporting Layers [ETL]* en inglés). La selección y diseño de los materiales para estas capas son clave para maximizar la eficiencia y estabilidad de las PSC. Por ejemplo, el esquema de la figura 2 representa una PSC en la que la luz (fotones) incide por el lado de un vidrio semiconductor (vidrio-ITO [*Indium Tin Oxide* en inglés]), atraviesa una delgada capa del HTL (NiOx) y luego llega a la capa absorbidora de luz (perovskita). Al absorber luz, la perovskita produce dos tipos de partículas cargadas: electrones y huecos, las primeras encuentran un camino hacia la capa siguiente (ETL) y los huecos encuentran camino por la capa de HTL. En los extremos del dispositivo están los contactos eléctricos que facilitan el flujo de las cargas que llegan y cierran el circuito para así producir energía a partir de la luz solar.



Ferromagneto. Fotografía por: Freepik.

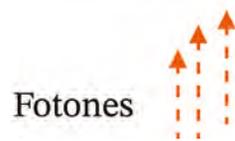
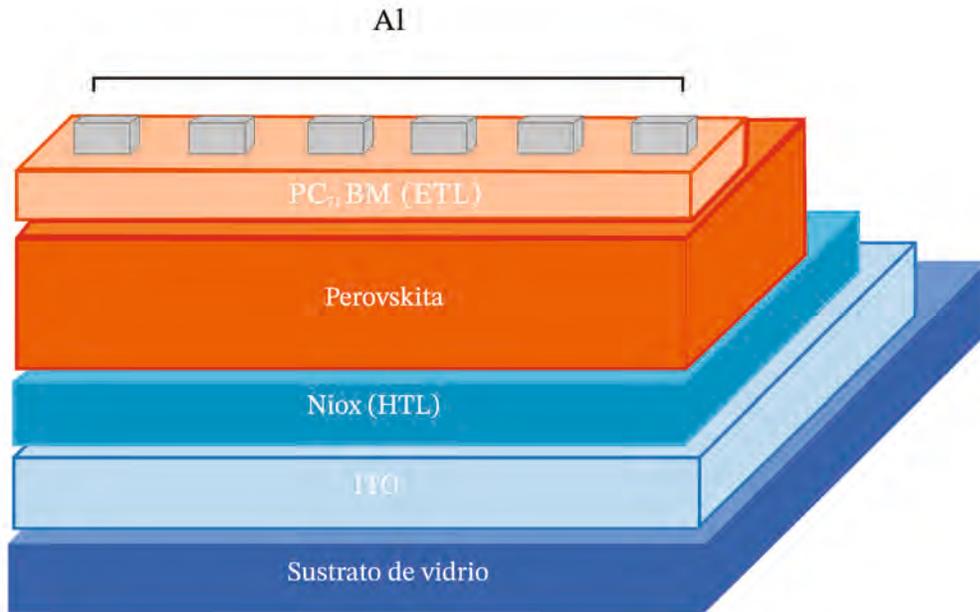


Figura 2. (a) Esquema de la estructura de una celda solar de perovskita (PSC) con arquitectura invertida.

(b) Celdas solares de perovskita fabricadas en la Universidad de los Andes, configuración ITO/NiOx/PVK/ETL/Ag.



En particular, la capa transportadora de huecos (HTL) ha sido objeto de intensa investigación, y entre los materiales considerados para esta función se encuentran materiales orgánicos e inorgánicos. Entre estos últimos se destacan el óxido de cobre (CuO), óxido de magnesio (MgO) y óxido de níquel (NiOx) [4]. Estos abundantes óxidos son relevantes en esta aplicación por propiedades como su estructura química que permite la extracción y movilidad de las partículas cargadas (huecos), su alta estabilidad (al calor, la humedad, la luz o la polarización eléctrica) y su buena disponibilidad con bajo costo.

Las celdas solares de perovskita representan una emocionante evolución en la tecnología solar, con el potencial de ofrecer una fuente de energía limpia y sostenible para el futuro al complementar los dispositivos basados en silicio. La investigación avanza de manera continua para mejorar el desempeño de las capas e innovar en las técnicas de fabricación y escalado. Todo esto en un panorama favorable para la mejora de la eficiencia, estabilidad y reproducibilidad de las PSC, al mismo tiempo que se allana el camino hacia su adopción a gran escala en la industria fotovoltaica.

## Supercapacitores

El uso de energías alternativas de carácter intermitente requiere de dispositivos de almacenamiento de energía que garanticen el suministro cuando la fuente generadora no está activa. Esto aún requiere mejorar la eficiencia y el rendimiento de las tecnologías usadas para este fin [5]. Los supercapacitores son uno de estos dispositivos, cuyo funcionamiento puede compararse al de una esponja, la cual puede absorber y liberar agua con rapidez; solo que en el caso del material supercapacitor, retiene energía en vez de algún líquido. Por lo tanto, un supercapacitor debe contener un material capaz de acumular carga eléctrica de forma significativa y eficiente, y también de ceder la carga para suministrar energía a un dispositivo. Entre los materiales que presentan esta propiedad de forma más relevante, se encuentran los óxidos metálicos, los cuales acumulan y liberan carga eléctrica debido principalmente a que experimentan reacciones químicas en las que aceptan y liberan electrones al medio (reacciones redox). Además, cuentan con importantes ventajas para este ámbito, como una elevada estabilidad, disponibilidad y bajo impacto ambiental [6].



Condensador. Fotografía por: Freepik.



La figura 3 muestra un esquema de un supercapacitor electroquímico basado en la reacción redox de óxido de manganeso ( $MnO_2$ ) en medio acuoso con iones de sodio ( $Na^+$ ) y sulfato ( $SO_4^{2-}$ ). El colector de corriente, ubicado a la izquierda, facilita la reducción de  $Mn(IV)O_2$  a  $Mn(III)OO\cdot Na$ , lo que implica la ganancia de un electrón ( $e^-$ ). Este proceso es la base para el almacenamiento de carga, ya que los electrones, que contienen la energía eléctrica, se almacenan en el material cuando este es reducido. Los cationes  $Na^+$  se mueven a través del separador hacia el otro electrodo para equilibrar la carga y cerrar el circuito interno. El separador permite el paso de iones mientras evita la mezcla directa de las soluciones en ambos lados de la celda, así asegura un almacenamiento de carga eficiente [6].

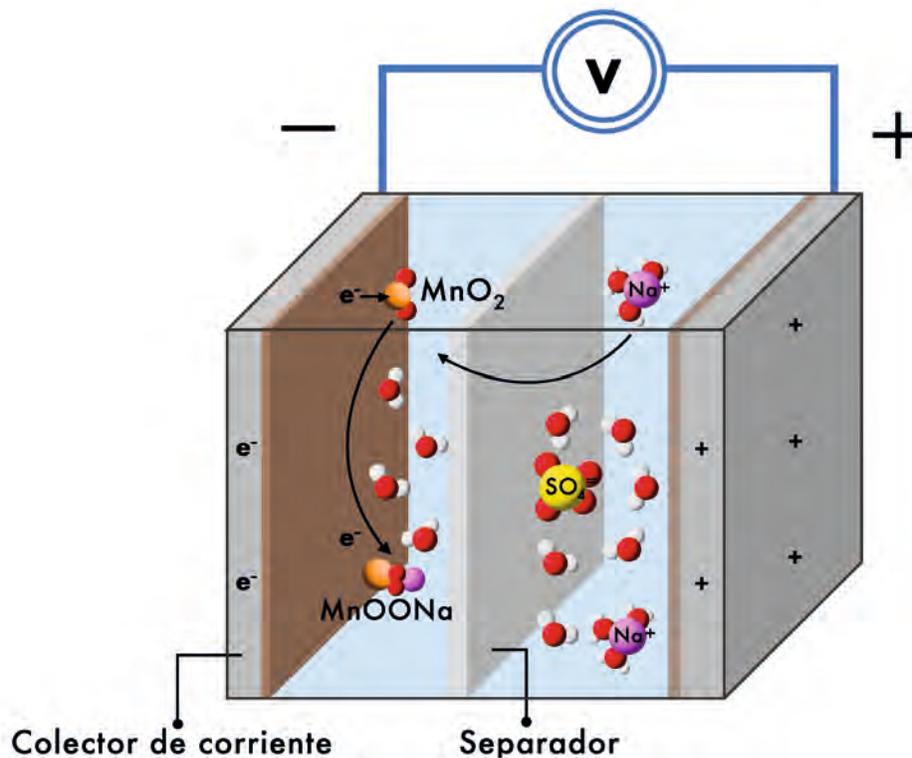


Figura 3. Mecanismo del almacenamiento de carga en un supercapacitor basado en óxido de manganeso. Figura adaptada de referencia [6].

Los óxidos de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ) y cobalto ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) son los más usados en el desarrollo de supercapacitores debido a que son metales de transición con múltiples estados de oxidación. Esta característica química es muy ventajosa, ya que gracias a ello experimentan procesos sucesivos de pérdida y ganancia de electrones, en los que el estado de oxidación del metal cambia, lo que permite el almacenamiento de cantidades significativas de carga eléctrica. Se destaca el óxido de cobalto, con conductividad eléctrica moderada y área superficial elevada, lo cual contribuye a que la transferencia de carga ocurra de manera rápida y, por ende, haya un mejor funcionamiento del supercapacitor [5].

En su mayoría, las estrategias que se investigan para mejorar el rendimiento y la vida útil de los óxidos metálicos comprenden su combinación con otros materiales basados en carbono o polímeros conductores, tales como la polianilina o el polipirrol [7]. Los compuestos basados en carbono cuentan con áreas superficiales elevadas, que favorecen la acumulación y liberación de energía como consecuencia del intercambio de carga en su estructura porosa. Por el lado de los polímeros conductores, un ejemplo es la combinación de polianilina con óxido de cobalto, en la que el material mixto permite almacenar carga de manera eficiente con una alta estabilidad debido al efecto sinérgico entre polímero y óxido.

## **Degradación química de contaminantes**

Una tecnología prometedora que emplea óxidos como material activo en el tratamiento de aguas residuales es la denominada fotoelectroquímica. En la figura 4 se muestra una celda fotoelectroquímica que consta de un recipiente de vidrio y en su interior un electrodo de trabajo (que contiene una capa del óxido metálico) y otros electrodos que completan el montaje, denominados electrodo de referencia y electrodo auxiliar. El electrodo que contiene el óxido metálico también es conocido como fotoánodo debido a que, gracias a la interacción con la luz en su superficie, ocurre una reacción química de oxidación de alguna sustancia. Debido a que el óxido metálico debe absorber luz, la celda contiene una cara especial hecha de un material que permite el paso de la energía sin absorberla, que es el cuarzo. Típicamente, la celda contiene una solución con los contaminantes a degradar por el proceso fotoelectroquímico, mediante el cual se irradia el óxido metálico al mismo tiempo que se le aplica un potencial eléctrico. Gracias a estos estímulos, ocurren fenómenos en la estructura fisicoquímica del óxido que conllevan a la generación de sustancias a partir del agua, conocidas como especies reactivas, las cuales rompen los enlaces químicos de los contaminantes convirtiéndolos en agua ( $H_2O$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en cuestión de minutos [8].

**Planta de tratamiento de aguas. Fotografía por: Freepik.**





Muchos óxidos se han empleado en el desarrollo de fotoánodos; entre los más utilizados está el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), que muestra una excelente actividad frente a una amplia gama de fuentes de radiación y, además, se puede obtener como una película sobre vidrio. Utilizar el óxido como una película es una gran ventaja, ya que aumenta el área de contacto y mejora la eficiencia del compuesto en la degradación de contaminantes. Este óxido ha demostrado ser efectivo en la degradación de antibióticos, pesticidas, colorantes y otros tóxicos. Además, el  $\text{TiO}_2$  como fotoánodo, puede reutilizarse en múltiples ciclos de degradación, lo que lo convierte en una opción prometedora, eficiente y económica para el tratamiento de aguas residuales asistido por radiación.

Algunos óxidos tienen defectos estructurales relacionados con su contenido de oxígeno; en consecuencia, se modifica el estado de oxidación del metal. Estas variaciones mejoran las propiedades ópticas y electrónicas, lo que resulta en una mayor eficiencia en la degradación de impurezas en el agua. Un ejemplo muy estudiado es el óxido de cerio (IV) ( $\text{CeO}_2$ ) que puede modificar su estado de oxidación entre +3 y +4 en su estructura cristalina, para generar sitios reactivos conocidos como vacancias de oxígeno, que aumentan el rendimiento en la producción de sustancias capaces de degradar los contaminantes [9].

En conclusión, los óxidos con su amplia área superficial, su estructura cristalina y sus múltiples estados de oxidación se consideran materiales prometedores en la degradación asistida por luz de tóxicos presentes en fuentes hídricas.

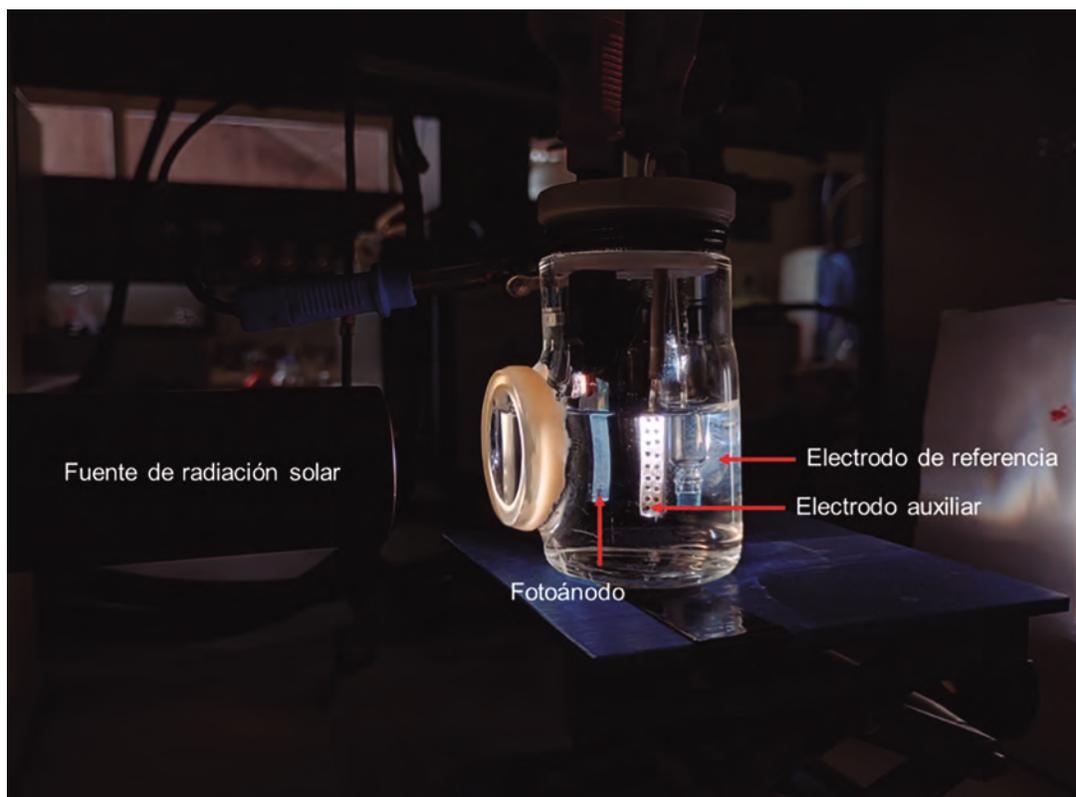


Figura 4. Celda fotoelectroquímica para la degradación de tóxicos presentes en aguas.

### ***Celdas de flujo redox***

Además de los capacitores, las baterías también son dispositivos utilizados para el almacenamiento de energía, entre las cuales destacan las de litio, plomo-ácido y, más recientemente, las baterías de flujo redox (BFR). Estas últimas han llamado la atención por la flexibilidad para desacoplar la densidad de energía y la densidad de potencia, las cuales son dos de los parámetros de trabajo más importantes en las tecnologías de almacenamiento de carga. El primero se refiere a la cantidad de energía por unidad de masa que puede almacenar el dispositivo, y el segundo caracteriza la rapidez con la que entrega la energía. Estos valores dependen de factores como el volumen y la concentración de los portadores de carga (iones en solución), y del número de celdas y el área superficial de los electrodos. Como se observa en la figura 5, el montaje de estas baterías consiste en dos soluciones almacenadas en tanques separados, que luego se bombean a la pila donde quedan separadas por una membrana de intercambio iónico. Estas soluciones contienen sustancias redox conocidas como anolito (puede experimentar oxidación) y catolito (puede experimentar reducción) y, según el potencial redox (energía requerida para experimentar la reacción) que presenten, se mejorará la capacidad de almacenamiento de energía de la batería [10].

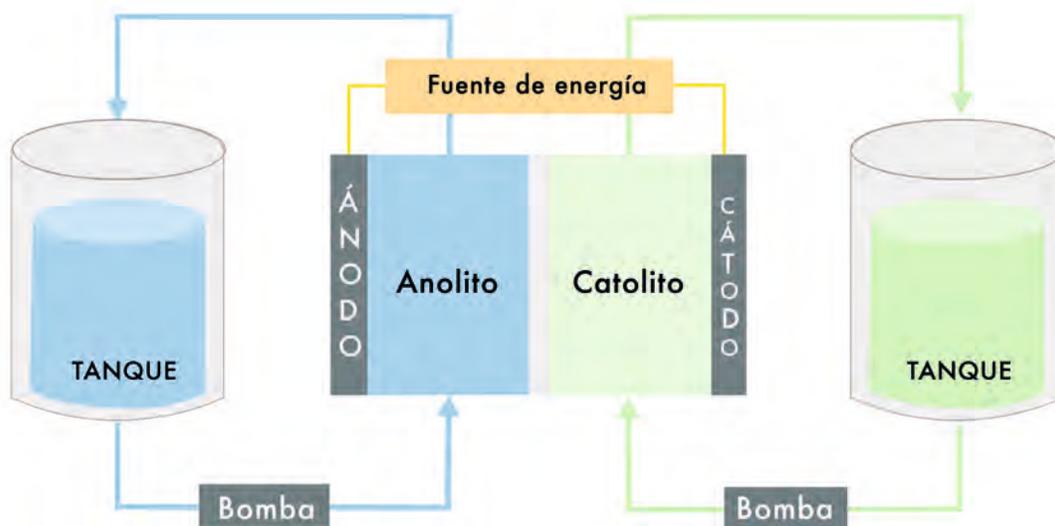


Figura 5. Esquema de una batería de flujo redox. Adaptado de la referencia [11].

Con el fin de comercializar las BFR, se busca optimizar factores como las propiedades de las especies activas redox, los materiales de la membrana separadora y los electrodos. En este orden de ideas, las características de los óxidos metálicos juegan un papel importante en la optimización de estas baterías. Por ejemplo, el  $V_2O_5$  es la materia prima para producir los electrolitos de las baterías de flujo redox de vanadio, las cuales son muy eficientes en almacenar energía a gran escala y tienen una vida útil muy larga. También son relevantes los óxidos metálicos, como el  $SiO_2$  aminado (modificado con grupos amino,  $-NH_2$ ), para funcionalizar las membranas separadoras y así mejorar su efectividad en evitar el paso de especies redox entre los recipientes.



Imagen diseñada por IA.

## Electrolisis del agua

En el camino de la transición energética, la electrolisis del agua es una de las tecnologías más prometedoras para la producción de hidrógeno combustible, el cual se considera un vector energético importante en la sustitución de los combustibles fósiles. Esta tecnología busca la descomposición de la molécula de agua mediante la reacción de evolución de hidrógeno (HER, por su sigla en inglés) y la reacción de evolución de oxígeno (OER, por su sigla en inglés), para producir hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) gaseosos, respectivamente. Para ello se usa un dispositivo llamado electrolizador, el cual consta de una celda electroquímica que contiene dos compartimentos separados por una membrana que permite solo el paso de los  $H^+$ .

En cada compartimento hay un electrodo (material semiconductor) sumergido en una solución acuosa que contiene sustancias ácidas, básicas o neutras. El electrodo sobre cuya superficie ocurre la reacción de oxidación del agua (o de los hidroxilos,  $OH^-$ ) se denomina ánodo y, de esta forma, se produce el oxígeno. En el otro compartimento ocurre la reacción de reducción del agua (o de los protones,  $H^+$ ) sobre la superficie del electrodo (cátodo) para producir el hidrógeno; el proceso de electrolisis se representa en la figura 6 [12]. Estas semireacciones químicas no son espontáneas, por lo cual se requiere del suministro de energía mediante una fuente de voltaje.

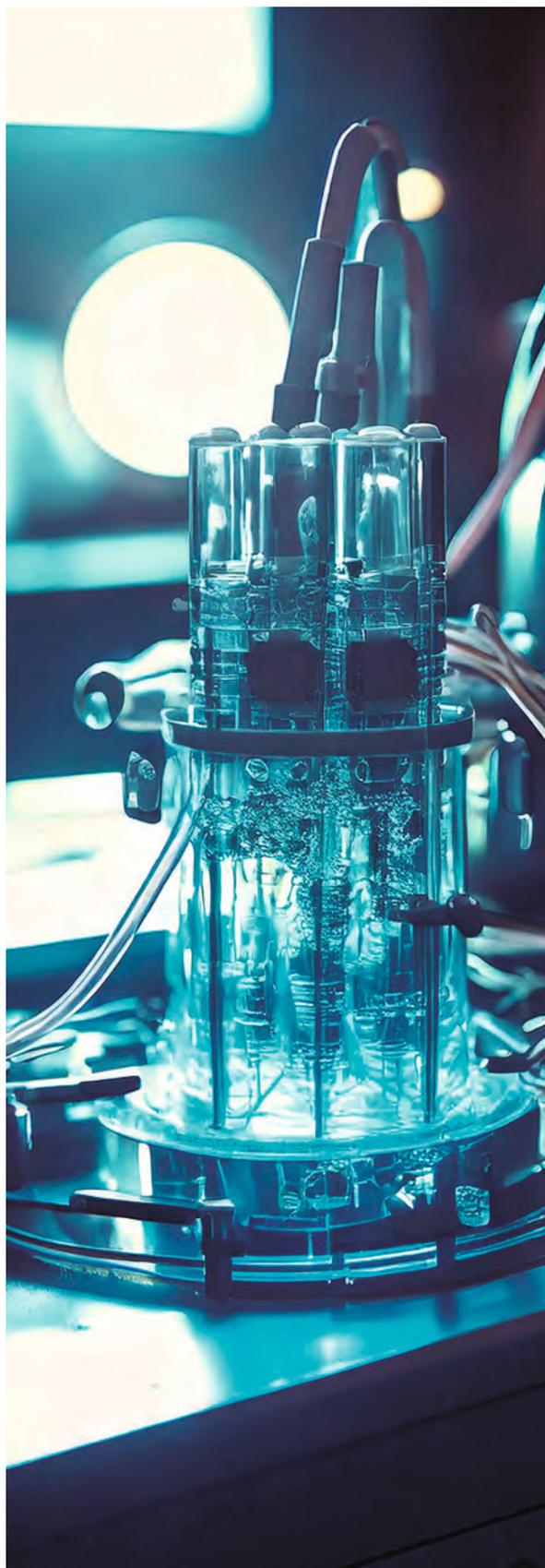


Imagen diseñada por IA.

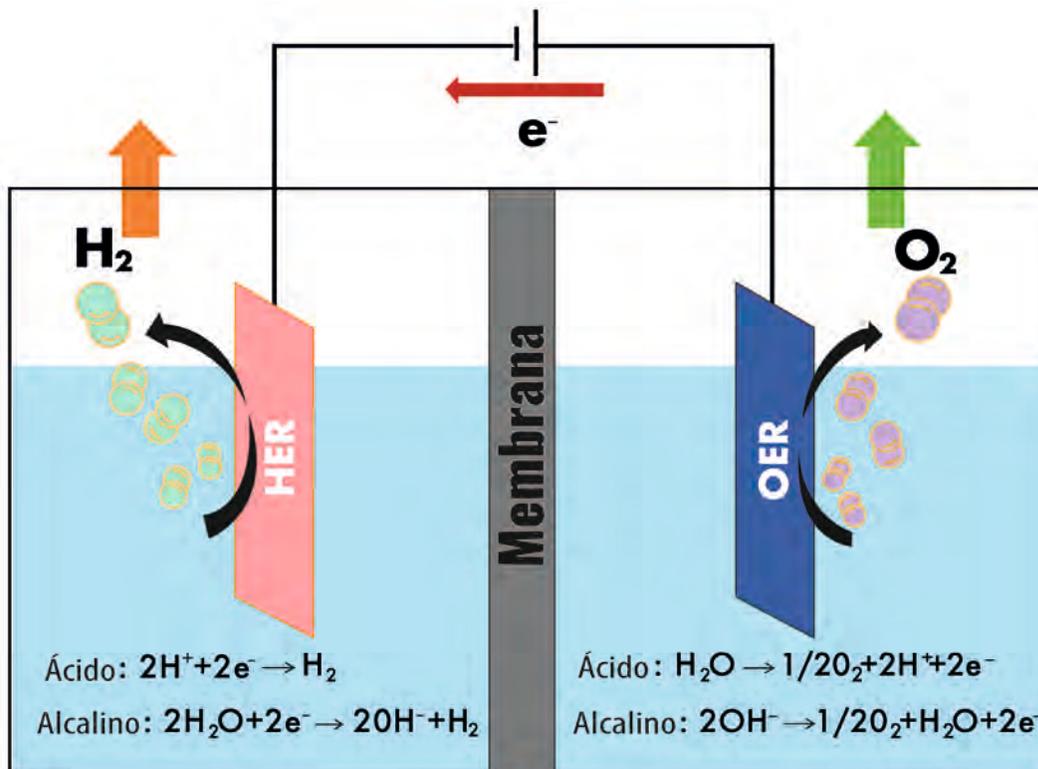
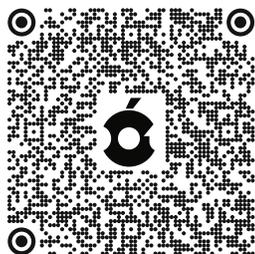


Figura 6. Esquema de la electrolisis del agua. En cada compartimento ocurre una semireacción que produce  $H_2$  gaseoso y  $O_2$  gaseoso. Adaptado de la referencia [12].

En la actualidad, el costo de los electrolizadores es bastante alto, debido principalmente a que los electrodos contienen catalizadores (sustancias que ayudan a que las reacciones ocurran de manera más eficiente) de metales nobles como el platino (Pt) o el iridio (Ir) que aumentan la velocidad de las reacciones químicas, pero también son sustancias muy costosas por su escasez. Por lo tanto, existe un gran interés en la sustitución de estos metales por sustancias más asequibles y abundantes, que presenten desempeños similares en el rendimiento de la reacción de electrolisis del agua. En este sentido, se ha explorado el uso de óxidos de metales de transición como compuestos químicos para la modificación de los electrodos.

Los óxidos más prometedores son los de cobalto, níquel, hierro y manganeso, debido a que pueden mejorar la cinética (velocidad) de los procesos de oxidación y reducción, gracias a su estructura electrónica que proporciona sitios activos para que las reacciones ocurran de manera más eficiente, es decir, son electrocatalíticos [13]. Esta propiedad recae en los múltiples estados de oxidación que presentan estos compuestos, lo cual ocasiona que se requiera menos energía para que ocurran las reacciones de interés. No obstante, todavía se requiere más investigación para obtener las combinaciones adecuadas de óxidos metálicos que se acerquen a la eficiencia obtenida con los metales nobles.

## Comparte este artículo:



## Referencias

- [1] Louwen A, Van Sark W, Schropp R, Faaij A. A Cost Roadmap for Silicon Heterojunction Solar Cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2016 abr; 147(1): 295-314. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.12.026>
- [2] Reading: Abundance of Elements in Earth's Crust [internet]. Lumen [citado 2024 ag. 31]. Disponible en: <https://courses.lumenlearning.com/geo/chapter/reading-abundance-of-elements-in-earths-crust-2/>
- [3] Suresh Kumar N, Chandra Babu Naidu K. A Review on Perovskite Solar Cells (PSCs), Materials and Applications. *J. Materiomics.* 2021 sept.; 7(5): 940-956. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.04.002>
- [4] González-Hernández M, Reyes SE, Erazo EA, Ortiz P, Cortés MT. Enhanced Inverted Perovskite Solar Cells via Indium Doped Nickel Oxide as Hole Transport Layer. *Sol. Energy.* 2024, jul.; 276(1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112657>
- [5] Poonam, Sharma K, Arora A, Tripathi SK. Review of Supercapacitors: Materials and Devices. *J. Energy Storage.* 2019, febr.; 21(1): 801-825. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.010>
- [6] Jost K, Dion G, Gogotsi Y. Textile Energy Storage in Perspective. *J. Mater. Chem. A.* 2014 febr.; 2(28): 10776-10787. <https://doi.org/10.1039/c4ta00203b>
- [7] Pérez-Torres AF, González-Hernández M, Ortiz P, Cortés MT. Statistical Study of the Influence of Electrosynthesis Conditions on the Capacitance of Polypyrrole. *ACS Omega.* 2022 abr.; 7(18): 15580-15595. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06843>
- [8] Kaur P, Park Y, Minami I, Imteaz MA, Khan MA, Al-Othman AAS, *et al.* Photoelectrocatalytic Treatment of Municipal Wastewater with Emerging Concern Pollutants Using Modified Multi-Layer Catalytic Anode. *Chemosphere.* 2023 oct.; 339(1): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139575>
- [9] Rianjanu A, Mustamin ASP, Melati EKA, Aflaha R, Khamidy NI, Utami M, *et al.* Photocatalytic Degradation of Aqueous Congo Red Dye Pollutants by Rare-Earth Metal Oxide (CeO<sub>2</sub>) Nanorods. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 2024 febr.; 682(1): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132919>
- [10] Olabi AG, Allam M A, Abdelkareem MA, Deepa TD, Alami AH, Abbas Q, *et al.* Redox Flow Batteries: Recent Development in Main Components, Emerging Technologies, Diagnostic Techniques, Large-Scale Applications, and Challenges and Barriers. *Batteries.* 2023 ag.; 9(8):1-44. <https://doi.org/10.3390/batteries9080409>
- [11] Villatoro, FR. Baterías de Flujo Redox Para Energía Eólica y Solar [Internet]. La ciencia de la mula Francis; 2014 en. 8 [citado 2024 ag. 31]. Disponible en: <https://francis.naukas.com/2014/01/08/baterias-de-flujo-redox-para-energia-eolica-y-solar/>
- [12] Han W, Li M, Ma Y, Yang J. Cobalt-Based Metal-Organic Frameworks and Their Derivatives for Hydrogen Evolution Reaction. *Frontiers in Chemistry.* 2020 nov.; 8(1): 1-18. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.592915>
- [13] Wang S, Lu A, Zhong C-J. Hydrogen Production from Water Electrolysis: Role of Catalysts. *Nano Converg.* 2021 febr.; 8(1): 1-23. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>



Turbina éolica. Fotografía por Freepik.