

Artículo

Materiales multielementales para impulsar la era del hidrógeno verde

América Libertad Higareda Alvear
Luis Carlos Ordóñez López

Artículo

Materiales multielementales para impulsar la era del hidrógeno verde

Cómo citar este artículo: Higareda-Alvear AL, Ordóñez-López LC. 2023. Materiales multielementales para impulsar la era del hidrógeno verde. Revista Ciencia y Naturaleza (1055).





¡El futuro es hoy!

“Creo que un día el agua será un carburante, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados solos o conjuntamente, proporcionarán una fuente inagotable de energía y de luz, con una intensidad que el carbón no puede”.

Julio Verne

La isla misteriosa es una novela que fue escrita por Julio Verne y publicada en 1874, muestra una visión futurista de la generación de energía limpia. El futuro nos ha alcanzado. El hidrógeno verde es una solución clave para la transición hacia una sociedad sostenible.



HYDROGEN

Estamos ante un reto socioambiental

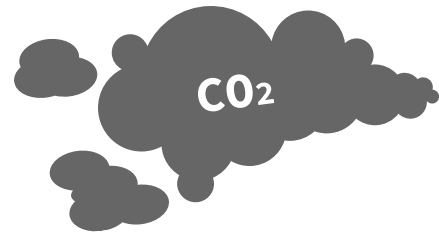
La quema de carbón para alimentar las máquinas de vapor significó un gran avance tecnológico, que marcó una etapa en la historia de la humanidad, conocida como “revolución industrial”. Desde entonces hemos dependido de los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural como fuentes de energía. El proceso de combustión, además de producir calor, genera gran cantidad de gases que se liberan a la atmósfera, entre ellos el dióxido de carbono (CO_2), que es el principal gas de efecto invernadero.



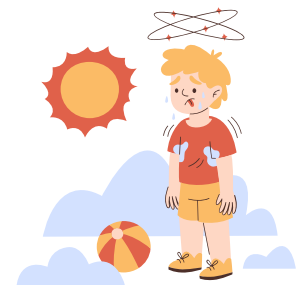
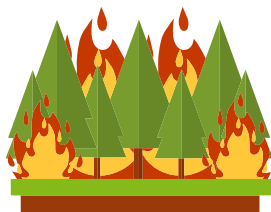
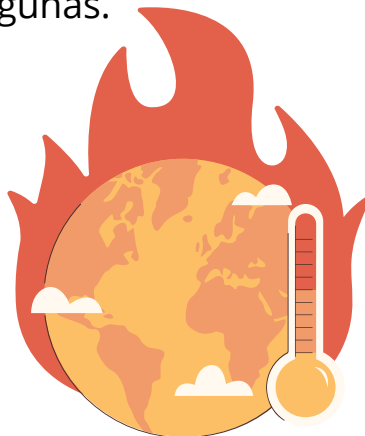
Debido al crecimiento de la población y sus necesidades de transporte, vivienda, comunicación e iluminación, se generó un creciente consumo de combustibles fósiles para cubrir la alta demanda energética. Esto ha impactado en la generación y acumulación de CO_2 en la atmosfera. A finales de la década de 1950, la concentración atmosférica de CO_2 alcanzó un máximo histórico, superando las 300 partes por millón (ppm). Desde entonces, los valores no han dejado de aumentar, observándose una tendencia exponencial.



De acuerdo con reportes del Laboratorio de Monitoreo Global (GML) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA), en abril de 2023, se registraron 423.28 ppm, esto es un incremento de 3.05 ppm en la concentración atmosférica de CO₂ con respecto al año pasado.



El aumento de las emisiones de CO₂ ha provocado un desequilibrio en el proceso natural de la Tierra para regular la temperatura, como consecuencia, el planeta se ha estado sobrecalentando. Las investigaciones han pronosticado que para evitar daños catastróficos al medio ambiente, el aumento de la temperatura global no debe superar los 1.5 °C con respecto a los niveles antes de la revolución industrial, porque si aumenta a 2 °C, las consecuencias serían irreversibles. Algunas consecuencias pronosticadas serían desastres naturales más intensos, epidemias, aumento del nivel del mar, sequías y olas de calor, temporadas más largas de incendios forestales, escasez de alimentos y de agua, por mencionar algunas.





Debido al panorama catastrófico que se ha previsto, es necesario hacer frente al cambio climático, por lo que se han establecido objetivos a nivel mundial como en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), celebrada en París el 12 de diciembre de 2015. Algunos de estos objetivos son reducir en un 45% las emisiones de gases de efecto invernadero para el 2030 y alcanzar las cero emisiones netas para el 2050.



Actualmente nos encontramos en una transición energética hacia sistemas eficientes de generación, almacenamiento y distribución de energía, los cuales no liberen gases de combustión a la atmósfera y se contribuya con la descarbonización del planeta.

Hidrógeno verde, esperanza para un futuro sostenible



La transición hacia un futuro sostenible requiere la implementación de ciclos de energía limpia, esto incluye a las energías renovables que aprovechan los recursos naturales como el Sol, el aire o el movimiento de las mareas para generar electricidad. Sin embargo, no es posible satisfacer la alta demanda energética únicamente con el uso de fuentes renovables, ya que no se logra un suministro uniforme y continuo de electricidad.

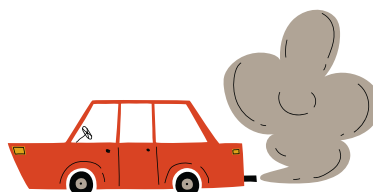


La principal causa es la intermitencia de las energías renovables por las variaciones en las condiciones climáticas, las estaciones del año y/o las características geográficas del lugar. Por ejemplo, las celdas fotovoltaicas que utilizan la energía del Sol solo la aprovechan durante el día. Una solución a este problema es abordada por las tecnologías del hidrógeno.



Enfocado al sector energético, el hidrógeno es un combustible con un alto contenido energético. Un kilogramo de hidrógeno genera casi tres veces más energía que la gasolina y el gas natural, pero para aprovechar este recurso es necesario producirlo. El proceso de obtención determina si es un combustible limpio o no.

El hidrógeno gris se obtiene de los combustibles fósiles, por lo que se generan contaminantes.



El hidrógeno azul es reformado del gas natural, pero con tecnologías de captura de carbono.



En cambio, **el hidrógeno verde** es el combustible más limpio, que se puede producir a partir de la disociación del agua usando electricidad (electrólisis del agua), incluso ha sido nombrado como el combustible del futuro.





Un escenario prometedor para un futuro sostenible es integrar las tecnologías del hidrógeno para el desarrollo de sistemas energéticos eficientes y amigables con el medioambiente. Cuando se tenga un pico en la generación de energía renovable, el exceso de electricidad se puede aprovechar en la producción de hidrógeno verde. De lo contrario, cuando la demanda este por arriba de la producción de energía, el hidrógeno verde puede recombinarse con el oxígeno del aire para liberar su energía en forma de electricidad, obteniendo solo calor y agua como subproductos. Este proceso se lleva a cabo en una celda de combustible de hidrógeno, un dispositivo electroquímico que prácticamente realiza el proceso inverso a la electrólisis del agua ($H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$).



Sin duda, el hidrógeno verde es un portador de energía o vector energético. La reorganización de los enlaces químicos del agua en hidrógeno y oxígeno es una forma de almacenar energía limpia para su transporte y su utilización posterior.



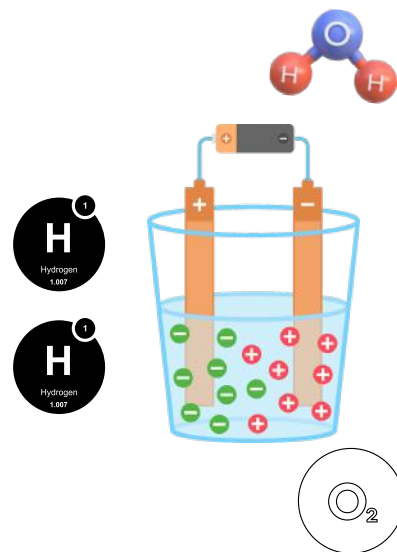
Además, el hidrógeno verde se puede usar en diversos procesos para hacerlos ecológicos y obtener productos de alto valor agregado con un mínimo impacto al medioambiente. Por ejemplo, puede interactuar con nitrógeno para producir amoníaco, que es la base de los fertilizantes. Se puede combinar con las emisiones de CO₂ capturadas de otros procesos industriales para generar combustibles sintéticos con las mismas propiedades que los derivados del petróleo.



Rompiendo la molécula del agua

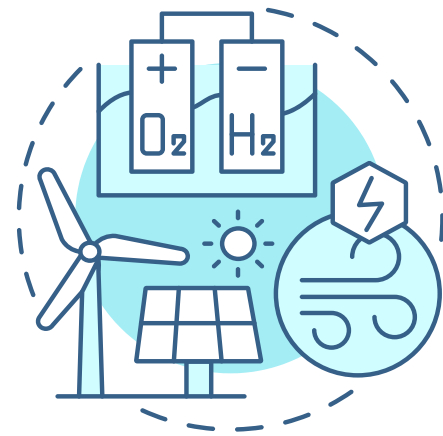
El agua (H₂O) está compuesta por dos átomos de hidrógeno (H₂) y un átomo de oxígeno (O₂), por lo que es una fuente rica en hidrógeno. La forma de obtener hidrógeno es a través de la electrólisis del agua, un proceso descubierto a principios del siglo XIX por dos químicos británicos, William Nicholson y Sir Anthony Carlisle, pocas semanas después de que Alessandro Volta inventara la pila eléctrica.

La palabra electrólisis se compone de dos raíces “electro” que se refiere a la electricidad y “lysis” que significa dividir o separar. Es decir, para romper la molécula del agua y separar el hidrógeno del oxígeno, necesitamos electricidad. La tecnología para la disociación del agua utilizando electricidad ya existe y se llama electrolizador. Se pueden encontrar diferentes tipos de dispositivos de acuerdo con la temperatura de operación y el medio iónico de trabajo que puede ser ácido, neutro o alcalino.





Los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (Electrolizadores PEM-WE) trabajan a temperaturas bajas, menores a 80 °C, y en medio ácido. Son adecuados para producir hidrógeno aprovechando la energía proveniente de fuentes renovables, ya que su tiempo de respuesta es rápida y las fluctuaciones eléctricas no son un inconveniente. Además, el hidrógeno obtenido, presenta un grado de pureza del 99.999%.



El corazón de un electrolizador PEM-WE (Figura 1) es una estructura formada por dos electrodos conductores, que se encuentran separados por una membrana polimérica sólida, lo que se conoce como ensamble membrana-electrodo. Así mismo, se tienen otros componentes como bombas, separadores de gases, placas difusoras, tanques de almacenamiento, entre otros.

Sin embargo, en los electrodos es donde se llevan a cabo las reacciones de intercambio de electrones, conocidas como reacciones electroquímicas.

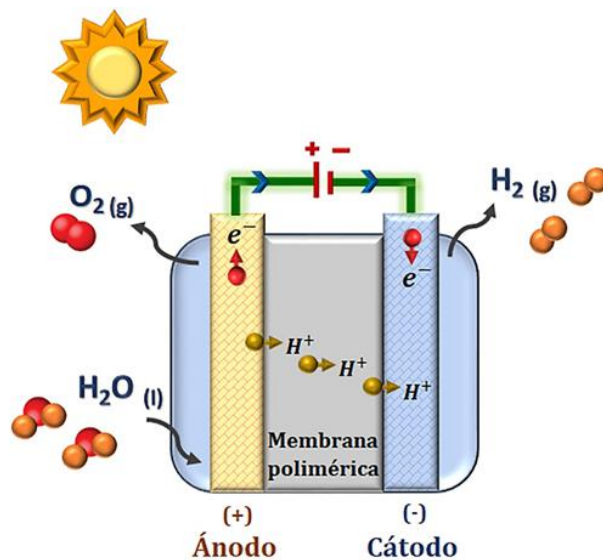
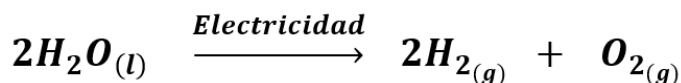


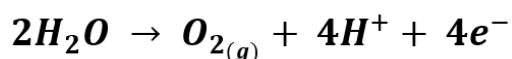
Figura 1. Esquema de un electrolizador PEM-WE.



La electrólisis del agua se lleva a cabo de acuerdo con la siguiente reacción general:

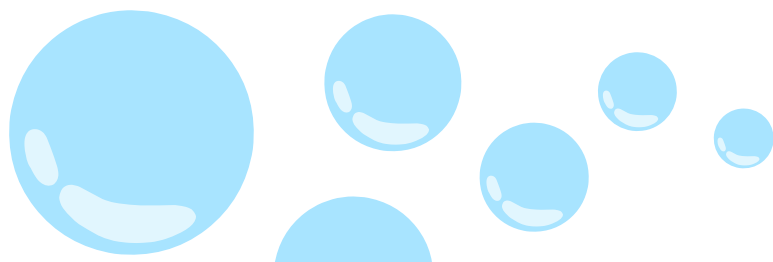
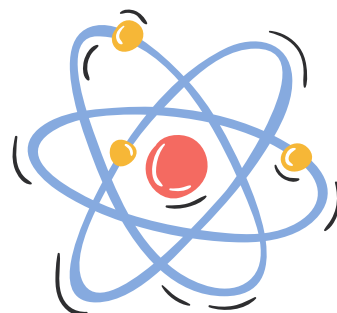
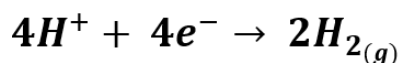


El electrolizador PEM-WE (Figura 1) se alimenta con agua del lado del ánodo (polo positivo), donde tiene lugar la reacción de evolución de oxígeno, de la siguiente manera:



El oxígeno formado en estado gaseoso puede liberarse a la atmósfera sin problema o almacenarse para su uso en aplicaciones médicas o industriales. Por otra parte, los protones (H^+), que son átomos de hidrógeno sin su electrón, son conducidos desde el ánodo hacia el cátodo (polo negativo) a través de la membrana polimérica. La membrana funciona como electrolito, es decir, no permite el paso de los electrones, ya que es un aislante electrónico, pero si conduce a las especies iónicas, especialmente es diseñada para el transporte de protones. Mientras que los electrones salen del ánodo a través de un circuito externo.

En el cátodo tiene lugar la reacción evolución de hidrógeno, los protones interactúan con los electrones y se convierte en hidrógeno molecular en forma de gas, de acuerdo con la siguiente reacción:





El secreto está en los materiales

La electrólisis del agua es una reacción muy lenta, y no es tan sencilla como parece, ya que existen diferentes etapas o pasos de reacción, donde se generan especies químicas intermedias antes de obtener el producto deseado, hidrógeno y oxígeno. Con el fin de acelerar la producción de hidrógeno y hacer el proceso rentable. Los electrodos se fabrican de materiales con propiedades catalíticas. Estos son los electrocatalizadores que favorecen o impulsan a que la reacción se lleve a cabo con alta eficiencia.



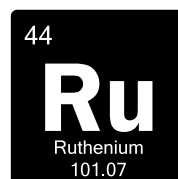
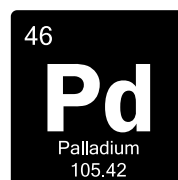
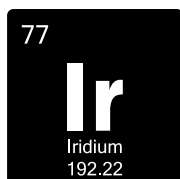
La superficie de un electrocatalizador necesita interactuar con los reactivos, es decir con el agua, para iniciar la ruptura de enlaces y la subsecuente formación de intermediarios y/o subproductos. Pero, al mismo tiempo, las especies generadas requieren una fuerza de unión débil para liberarse fácilmente de la superficie del electrocatalizador. Por lo tanto, la interacción del electrocatalizador con cada una de las especies químicas involucradas en la reacción (reactivos, intermediarios y productos) debe ser específica y óptima. Aunque no existe un metal puro que lo consiga, el metal más adecuado es aquel que presenta un equilibrio en la energía de unión, ni tan fuerte ni tan débil, como lo menciona el principio de Sabatier.



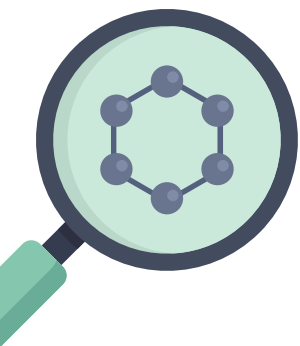
Debido a la naturaleza de las especies químicas involucradas en la producción de hidrógeno y por las condiciones de operación de un electrolizador PEM-WE, los electrocatalizadores se basan en metales nobles.



El platino (Pt) es utilizado como electrodo para el cátodo y el óxido de iridio (IrO_2) para el ánodo por tener una energía de unión óptima y una buena estabilidad en comparación con el oro (Au), paladio (Pd), rutenio (Ru), entre otros metales nobles. Sin embargo, estos metales nobles son altamente costosos, poco abundantes e incluso su extracción llega a ser difícil. Esto da como resultado electrodos extremadamente costosos que limitan la implementación a gran escala de los electrolizadores y especialmente en la sociedad. Hasta ahora esta tecnología se ha centrado en aplicaciones específicas, por ejemplo, para misiones espaciales.

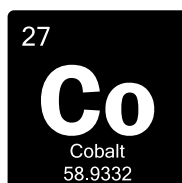
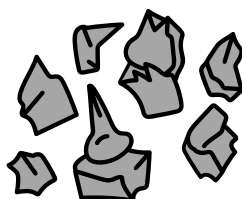


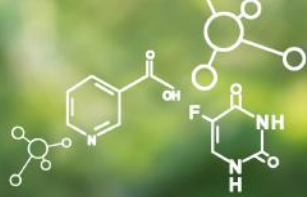
Se han realizado numerosas investigaciones en la ciencia e ingeniería en la búsqueda de materiales catalíticos altamente eficientes, estables, accesibles y de bajo costo, donde la nanotecnología ha tenido un papel importante. La nanotecnología nos ha permitido manipular la materia a escala nanométrica para modificar la estructura molecular de los materiales, y así obtener mejores y hasta nuevas propiedades con respecto a los materiales convencionales.



La mayoría de las investigaciones se han enfocado en sintetizar nanopartículas (partículas que no superan los 100 nanómetros), así como nanocompuestos, que son materiales que integran a las nanopartículas en un bajo porcentaje sobre un material base o también llamado matriz. Estas nanopartículas pueden ser de un elemento o combinaciones de diferentes elementos.

Con este enfoque se ha combinado el platino y el iridio con otros metales nobles o metales de transición. Aunque se han obtenido propiedades catalíticas superiores, la contribución de los metales nobles sigue estando presente, por lo que la producción en masa de los electrodos no sería viable a largo plazo. Otra estrategia para el diseño de electrocatalizadores se basa en utilizar únicamente metales de transición, principalmente el níquel (Ni), hierro (Fe) y cobalto (Co), que son más baratos y más abundantes que los metales nobles, pero aún queda camino por recorrer antes de que los electrodos libres de metales nobles sean competitivos con las eficiencias del platino e iridio.





Un cambio de paradigma hace posible el desarrollo tecnológico

A partir de un material compuesto por dos elementos, se considera la distribución o arreglo de los diferentes átomos que pueden estar desordenados u ordenados (Figura 2). Si están desordenados (mezclados al azar) se denomina aleación. En cambio, si existe un orden de largo alcance que crea interfaces entre los elementos, es un compuesto intermetálico.

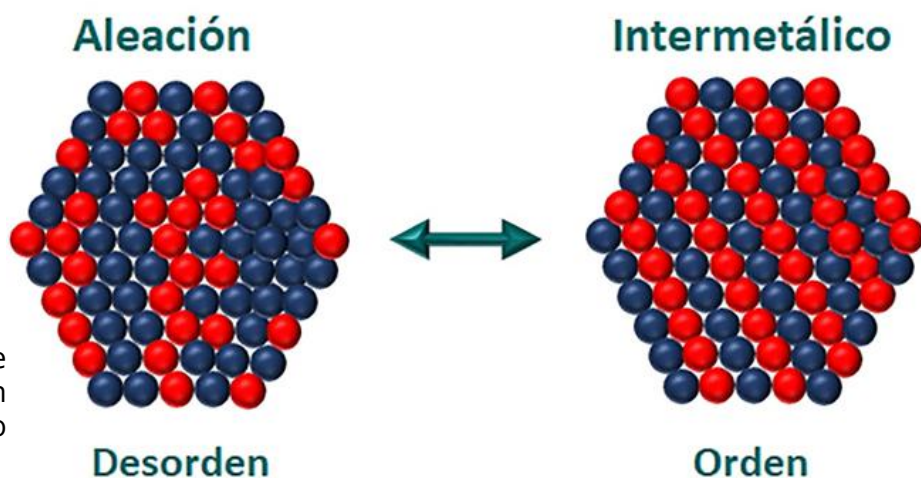


Figura 2. Estructuras de dos elementos: aleación (izquierda) e intermetálico (derecha).

Cuando se combinan más y más elementos (Figura 3), la entropía, una magnitud termodinámica que nos indica el grado de desorden molecular, aumenta y esto favorece la solubilidad de la mezcla. La alta entropía de la mezcla rompe la inmiscibilidad entre los átomos y se promueve la formación de una aleación o solución sólida en lugar de un compuesto intermetálico o distintas fases posibles. En una solución sólida los átomos de los diferentes elementos se integran en una misma estructura cristalina.

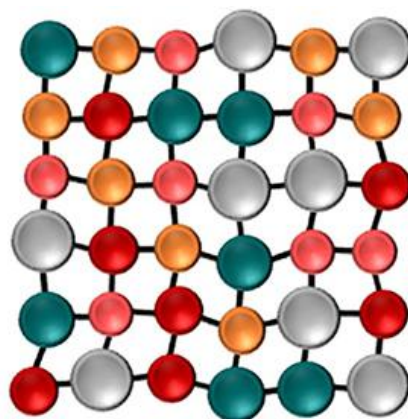
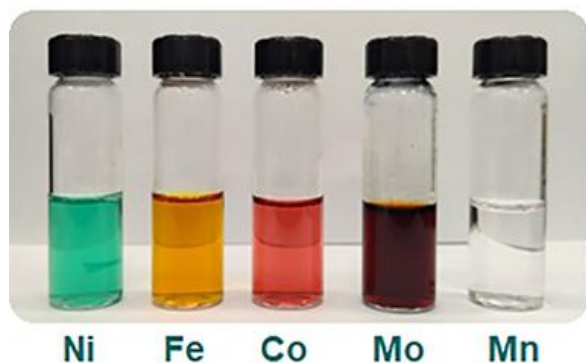
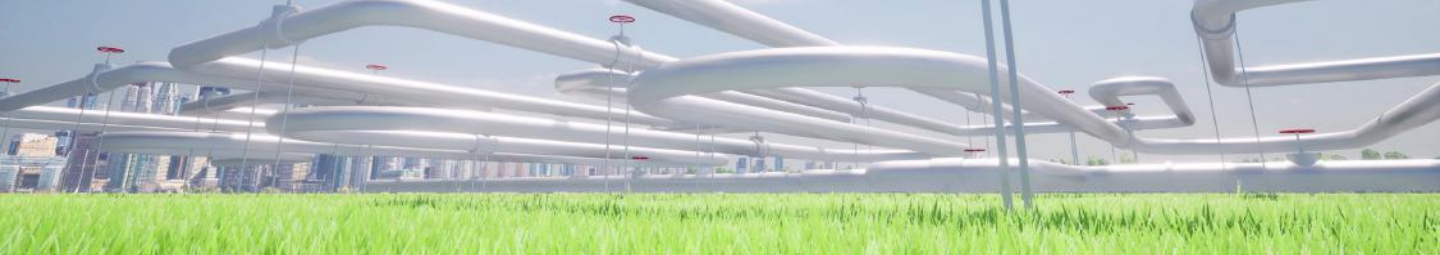


Figura 3. Soluciones precursoras en medio acuoso de metales de transición (izquierda) y esquema representativo de una estructura de alta entropía, los elementos se encuentran localizados al azar en la red cristalina (derecha).

Las aleaciones de alta entropía representan un sistema multicomponente, se consideran un cambio de paradigma ya que durante varias décadas predominaron las aleaciones convencionales que se componen de un elemento principal en mayor concentración y otros componentes en menor proporción, llamados aleantes o elementos dopantes, por ejemplo, el acero. Además, se sabía que existe un límite en la concentración de los aleantes y en el número de elementos incorporados.

Así, el diseño de las aleaciones convencionales se basó en las cuatro reglas de Hume-Rothery las cuales establecen las condiciones para que se forme una solución sólida o aleación. Estas reglas están relacionadas con las propiedades de los elementos aleados y nos dice que el tamaño atómico, la electronegatividad, el estado de valencia y la estructura cristalina, deben de ser similares o presentar una mínima diferencia entre ellos. Si no se cumplen estas reglas es altamente probable que no se forme una aleación, más bien se favorece un compuesto intermetálico o la formación de varias fases. Por lo tanto, el mundo de las aleaciones convencionales quedó restringido.



Fue en el 2004 que comenzó la era de las aleaciones de alta entropía y con esto varios paradigmas fueron derribados. Ahora se conoce y se ha demostrado que, si la entropía del sistema es suficientemente alta, es posible obtener estructuras de una sola fase que sobrepasan los límites de las reglas de Hume-Rothery. Este descubrimiento permitió ampliar enormemente el número de posibles aleaciones, por lo tanto, nos ha llevado a explorar propiedades que hasta el momento no se conocían.

Desde esta perspectiva, los materiales se pueden clasificar de acuerdo con el nivel de entropía que está estrechamente relacionado con la composición elemental del sistema. Materiales de baja entropía, incluye estructuras de 1 y 2 componentes. Los materiales de 3 y 4, se consideran de media entropía. Mientras que las estructuras de 5 a más elementos se denominan materiales de alta entropía (Figura 4).

A diferencia de las aleaciones convencionales, en las aleaciones de alta entropía todos los elementos son principales, presentando un rango de composición atómica entre 5% a 35%.

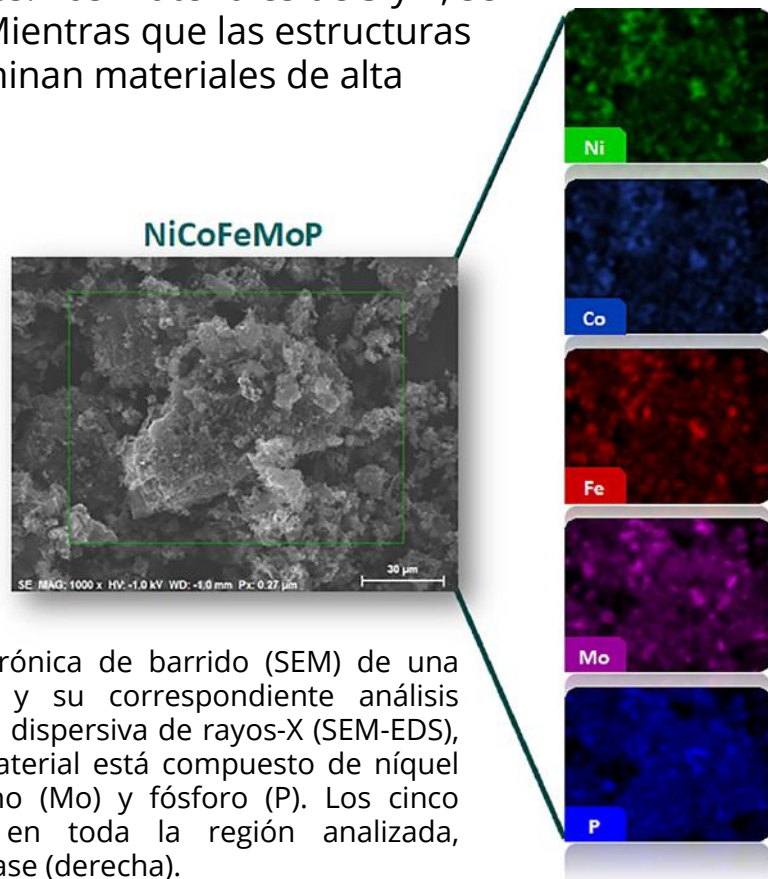


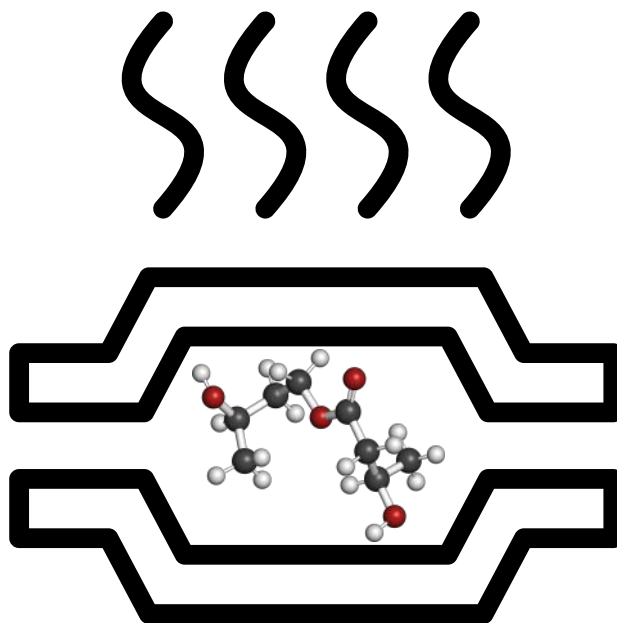
Figura 4. Imagen de microscopía electrónica de barrido (SEM) de una aleación de alta entropía (izquierda) y su correspondiente análisis elemental por espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (SEM-EDS), donde claramente se observa que el material está compuesto de níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe), molibdeno (Mo) y fósforo (P). Los cinco elementos se encuentran dispersos en toda la región analizada, comprobando la formación de una sola fase (derecha).



Diversidad elemental, un espacio de grandes posibilidades

A partir del 2010 comenzó un amplio interés en el estudio de los materiales de alta entropía para diferentes áreas de investigación, incluyendo las aplicaciones en la conversión y almacenamiento de energía limpia.

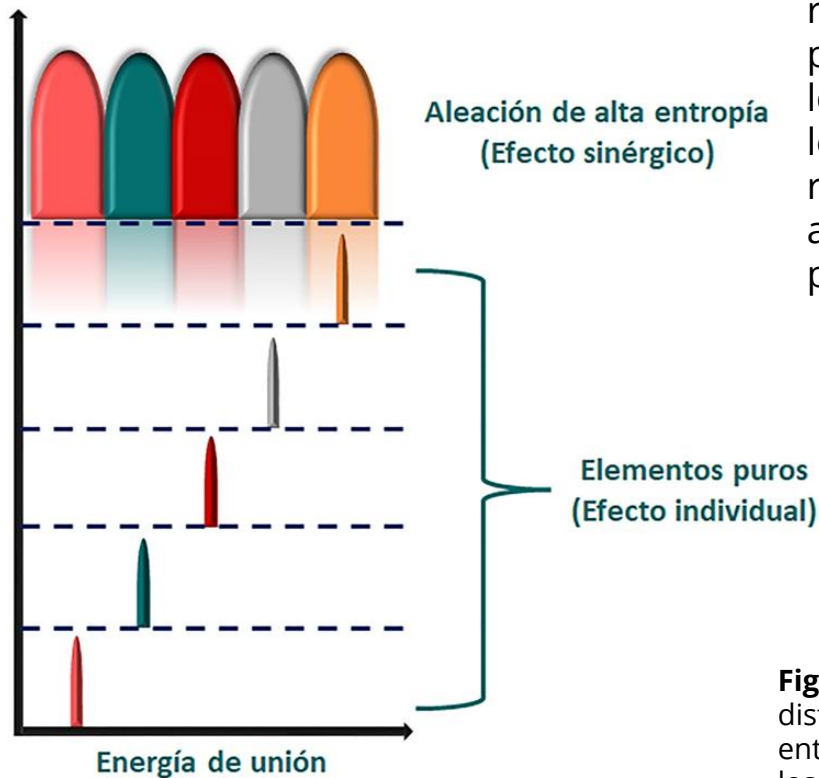
En el campo de las aleaciones de alta entropía, se originan diferentes y múltiples interacciones entre los átomos de los elementos que la componen, debido al alto número de combinaciones posibles, recordando que es un arreglo al azar. En un material catalítico, se refiere a la creación de numerosos y diversos sitios activos, que es un arreglo geométrico de átomos donde se lleva a cabo la interacción con las especies químicas que participan en las reacciones electroquímicas.



Esta diversidad elemental crea un efecto sinérgico en los materiales. Es decir, la acción conjunta, presenta un efecto superior a la suma de los elementos individuales.



En un material catalítico estabilizado por la alta entropía, el efecto sinérgico da como resultado que la energía de unión de la superficie del electrocatalizador pueda expandirse hasta transformarse en un espectro casi continuo de energía. Es decir, la superficie del electrocatalizador podría interactuar con cada una de las especies químicas involucradas en el proceso de electrocatálisis con la energía específica y óptima, logrando aumentar potencialmente la velocidad de reacción. Por lo tanto, se esperan procesos electroquímicos muy cercanos al ideal. En cambio, los electrocatalizadores de un solo elemento solo presentan un valor de energía de unión (Figura 5).

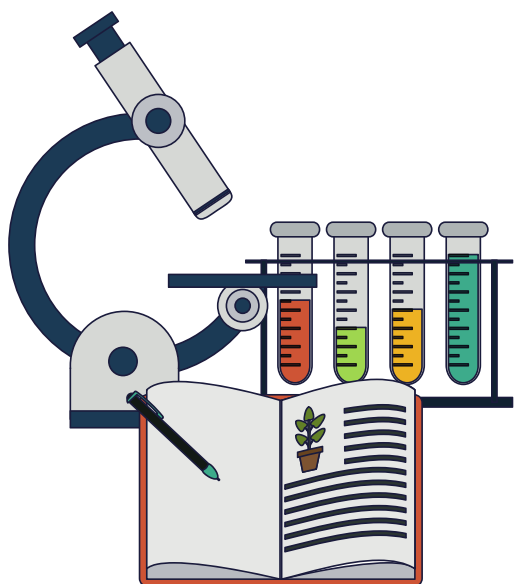


Algo similar sucede con los materiales de dos o tres componentes. Aunque se reconoce que, si presentan propiedades superiores a los elementos puros, están lejos de reunir los requerimientos en cuanto a rendimiento catalítico para su aplicación práctica.

Figura 5. Comparación de la distribución de la energía de unión entre una aleación de alta entropía y los elementos puros.

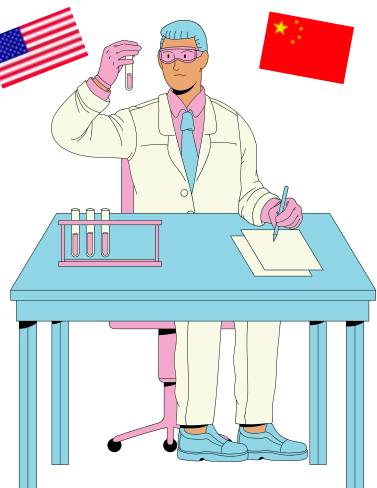


Las diversas interacciones y efectos extraordinarios que surgen al combinar múltiples elementos basados en el concepto de alta entropía han llevado a la comunidad científica a explorar estos materiales incorporando únicamente metales de transición en la fabricación de electrodos eficientes, estables, duraderos y rentables para el funcionamiento de un electrolizador PEM-WE. Lo cual, podría ser un camino viable para sustituir el uso de metales nobles, incluyendo el platino y el iridio.



Investigaciones recientes han diseñado electrocatalizadores de alta entropía y fueron evaluados para la reacción de evolución de oxígeno (REO) en un electrolito alcalino. Investigadores de la escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales del Instituto de Tecnología de Harbin en China desarrollaron un electrocatalizador libre de iridio.

Es una aleación compuesta de cinco metales: aluminio (Al), níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe) y molibdeno (Mo). El electrocatalizador de alta entropía de AlNiCoFeMo tan solo requiere un sobrepotencial de 240 mV para alcanzar una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} .



Investigadores del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad de Maryland en Estados Unidos, sintetizaron un fosfato de alta entropía. El material de CoFeNiMnMoPi presentó un sobrepotencial de 270 mV para una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} . Otro ejemplo es la aleación de MnFeCoNiCu , diseñada por un grupo de científicos del Departamento de Química de la Universidad Renmin de China. Este material presentó un sobrepotencial de 245 mV para una densidad de corriente de 10 mA cm^{-2} .

Comparado con los electrocatalizadores comerciales de óxido de rutenio y óxido de iridio, que presentaron sobrepotenciales de 346 mV y 340 mV, respectivamente. Las aleaciones de alta entropía demostraron un excelente desempeño catalítico. La gran diversidad elemental de estos materiales les otorga propiedades extraordinarias que aún estamos por descubrir. Quizás más adelante, volveremos a decir ¡El futuro es hoy! Un escenario donde las aleaciones de alta entropía sean reconocidas por su contribución significativa para dar el salto a la era del hidrógeno verde. 🍀

Efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno natural, el cual parte de la radiación solar que llega a la tierra, es reflejada de regreso a la atmosfera. Los gases de efecto invernadero naturalmente ayudan a retener el calor, lo que mantiene la superficie de la Tierra a temperaturas adecuadas para la vida. Sin embargo, el aumento de las emisiones de estos gases, principalmente CO_2 , han provocado un desequilibrio en la regulación natural de la temperatura del planeta, dando lugar al calentamiento global.



Alta entropía en las aleaciones

La formación de una aleación o de un compuesto intermetálico es una competencia entre la entalpía (ΔH) y la entropía (ΔS) de la mezcla (o del sistema), de acuerdo con la ecuación de Gibbs-Helmholtz:

$$\Delta G_{mezcla} = \Delta H_{mezcla} - T\Delta S_{mezcla}$$

Un valor negativo en la energía libre de Gibbs (ΔG) indica que el sistema es favorable para la formación de una aleación. Mientras que un valor positivo de la energía libre de Gibbs apoya la separación de fases (compuesto intermetálico).

De acuerdo con la ecuación de Gibbs-Helmholtz, para favorecer la síntesis de una aleación (ΔG negativa), el valor de la entropía de la mezcla debe ser suficientemente alto para superar la entalpía del sistema, esto se favorece al incrementar los componentes del sistema a un número igual o mayor a 5 elementos, ya que la composición está estrechamente relacionada con la entropía configuracional del sistema. Entonces, se dice que la aleación es estabilizada por la alta entropía de la mezcla.



Agradecimientos

América Libertad Higareda Alvear agradece a CONAHCYT por la beca otorgada a través de la convocatoria de Estancias Posdoctorales por México 2022. Se agradece al Laboratorio Nacional de Caracterización de Materiales (LaNCaM) de CFATA-UNAM y al Dr. Rodrigo Alonso Esparza Muñoz por las imágenes de SEM-EDS. También a Carlos Jared Uribe Caamal estudiante de licenciatura por su participación en el proyecto.

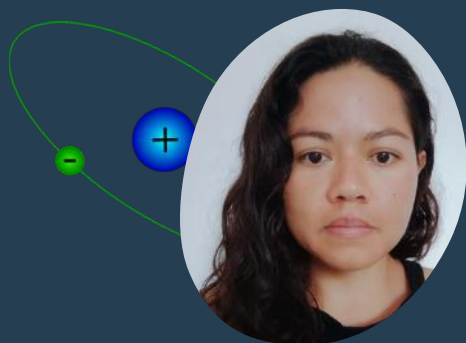
Crédito de imágenes en orden de aparición: FelixMittermeier (pixabay, P), pcess609 (Getty Images, GI), Scharfsinn86 (GI), Jamie Cabatit (Trendify, T), Chris LeBoutillier (Pexels, Pe), Kourosch Qaffari (Pe), fitri nurani's Images, Natali Barbani (sketchify, Sk), taras95, alexsl, Lanksydesing, siriwannapatphotos, Craftery Co, Quarta-Desing, Sakorn Sukkasemsakorn, BRGFX, NotionPic, Elena Sharipova, Vectortradition, vanitjan, Juan Ramon Roballo's Images, Vectortradition, Pepermprom, Mahawanjam, Sylph Creatives, vanitjan, bsd studio, Marcus Millo (GI), Asim Faraz, Skywalker_I (GI), Arthon meekodong, alexlmx, xella, Hafizdzaki Mcd, Aurielaki, Yuuji (GI), anatolir, Andrey Roussanov, xella, amethyststudio, Icons8, Ianna Rallonza (Sk), Oleksandr, JosepMonter (P), Elnur, amethyststudio, Studio Molekuul's Images, Snapwire (Pe), Giuseppe Ramos J, Skertchify, SAGM (P), PapaOsmosis (P), Tom Swinnen (Pe), M.Wallflower (T), Thanakorn, Scharfsinn86 (GI), Edukka (Ryska Erliansyah), thommas68 (P), Sketchify, Marcus Millo (GI).

Diseño de publicación: Yareli Fiburcio



Para Consulta

- Quiñones L. 2020. Llegar a cero emisiones netas de carbono para 2050, ¿es posible? La revista. <https://www.larevista.cr/llegar-a-cero-emisiones-netas-de-carbono-para-2050-es-posible/>.
- DW Español. 2021. Hidrógeno verde: ¿punto de inflexión para América Latina? <https://www.youtube.com/watch?v=kQUCAu8XqNk>
- Higareda A, Mares F, Esparza R. 2022. En la búsqueda de nanomateriales para un futuro sustentable. <https://ciencia.unam.mx/leer/1310/en-la-busqueda-de-nanomateriales-para-un-futuro-sustentable>.
- Cordón-Vera F. 2021. Alta entropía. <https://www.atispain.com/blog/alta-entropia/>
- Ipadeola AK, Lebechi AK, Gaolatlhe L, *et al.* 2022. Porous high-entropy alloys as efficient electrocatalysts for water-splitting reactions. *Electrochemistry Communications* 136: 107207. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2022.107207>.



América Libertad Higareda Alvear

Investigadora postdoctoral adscrita al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Obtuvo su doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales por el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la Universidad Nacional Autónoma de México (CFATA-UNAM) en el 2022. Su investigación se enfoca en la síntesis y diseño de electrocatalizadores libre de metales nobles basados en aleaciones de alta entropía para la reacción de evolución de oxígeno.

contacto: alhigareda90@gmail.com



Luis Carlos Ordóñez López

Profesor-Investigador Titular B, Unidad de Investigación en Energía Renovable (UER), Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Ingeniero Químico y Maestro en Ingeniería Química (Procesos), Facultad de Química-UNAM. Doctorado en Ingeniería (Energía), Centro de Investigación en Energía, UNAM. Su línea de investigación es desarrollo de materiales electrocatalíticos libres de metales nobles para la oxidación electroquímica de alcoholes de bajo peso molecular.

contacto: icol@cicy.mx