



PERSPECTIVAS ACTUALES EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO: UN ENFOQUE EN LA FOTOCATÁLISIS Y SUS AVANCES

Current perspectives on hydrogen production: a focus on photocatalysis
and its advances

Carlos Daniel Constantino Robles*

Rufino Nava Mendoza

María de los Ángeles Cuán Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México

*carlos30.constantino@gmail.com

01



Resumen

El hidrógeno es considerada una solución viable en la transición hacia fuentes de energía limpias y sostenibles. Su potencial como un combustible versátil y ecológico lo convierte en un recurso prometedor para disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Actualmente existen varios procesos para obtener hidrógeno; sin embargo, algunos generan emisiones de gases contaminantes. Un método alternativo involucra el uso de materiales semiconductores fotocatalíticos, los cuales funcionan absorbiendo la luz solar, desencadenando una serie de reacciones químicas

para descomponer el agua y liberar hidrógeno. Aunque los semiconductores fotocatalíticos aún enfrentan desafíos para su aplicación, tienen un gran potencial y hay avances continuos en investigación y desarrollo para mejorar su eficiencia y la estabilidad. En la presente se incluye un panorama general de los métodos para obtener hidrógeno, enfatizando en el uso de semiconductores fotocatalíticos. También se proporciona una breve descripción de algunas investigaciones sobre materiales fotocatalíticos para la producción de hidrógeno.

Palabras clave: descarbonización, eficiencia fotocatalítica, fotocatalisis, hidrógeno, par electrón-hueco, perovskitas, semiconductores.

Abstract

Hydrogen is considered as a viable solution in the transition to clean and sustainable energy sources. Its potential as a versatile and non-polluting fuel renders it a promising resource for reducing dependence on fossil fuels. There are currently several methods for obtaining hydrogen; however, some of them generate polluting gas emissions. An alternative method involves the use of photocatalytic semiconductor materials, which work by absorbing sunlight, triggering a series of chemical reactions to

decompose water and release hydrogen. Although photocatalytic semiconductors still face challenges for application, they have great potential and there are ongoing advances in research and development to improve their efficiency and stability. The present research includes an overview of methods to obtain hydrogen, with emphasis on photocatalytic semiconductors. A brief description of some research on photocatalytic materials for hydrogen production is also provided.

Keywords: decarbonization, photocatalytic efficiency, photocatalysis, hydrogen, electron-hole pair, perovskites, semiconductors.



Introducción

El hidrógeno representa una fuente de energía prometedora en la búsqueda de soluciones para la transición hacia un futuro más sostenible y limpio. Su versatilidad y bajo impacto ambiental lo convierten en una opción atractiva para diversas aplicaciones energéticas [1]. Existen varias fuentes de hidrógeno, incluyendo los combustibles fósiles y la biomasa. Asimismo, se pueden encontrar numerosas opciones en las tecnologías de producción, como procesos químicos, biológicos, electrolíticos, fotocatalíticos y termoquímicos [2].

La producción de hidrógeno se realiza convencionalmente por métodos como el reformado de vapor y la electrólisis; sin embargo, presentan desafíos relacionados con la liberación de gases de invernadero y el consumo de energía [3]. En este contexto, la fotocatalisis es una alternativa atractiva y sostenible [4] que implica el uso de materiales semiconductores para propiciar reacciones químicas mediante la absorción de luz solar. Empero, aún existen obstáculos en términos de estabilidad y eficiencia en los materiales, así como de optimización de procesos a gran escala [5].

La fotocatalisis aprovecha la energía solar para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. Al exponerse al sol, los semiconductores fotosensibles generan pares electrón-hueco que forman una serie de reacciones químicas y originan la división de la molécula del agua en sus componentes básicos [6], [7]. Este proceso ofrece ventajas significativas, incluyendo la implementación de una fuente de energía limpia y renovable, así como la producción de hidrógeno puro sin emisiones de efecto invernadero [7].

Se han explorado diversas estrategias, como el dopaje con metales de transición, para incrementar el rendimiento fotocatalítico. Los semiconductores de perovskita, por ejemplo, han captado atención en la investigación de procesos fotocatalíticos debido a sus notables propiedades ópticas y electrónicas [5], [6]. Entre ellos, el titanato de estroncio (SrTiO_3) representa un candidato prometedor para aplicaciones como la división del agua y la fotodegradación de contaminantes orgánicos. En este contexto, Su y colaboradores [9], [8] sintetizaron SrTiO_3 dopado con aluminio, y constataron una reducción en la banda prohibida y una duplicación de la actividad fotocatalítica en la división del agua. Asimismo, Kafeshane *et al.* [10], [8] desarrollaron muestras de SrTiO_3 co-dopadas con níquel y cadmio al 5 %, logrando un rendimiento notable en la foto-degradación de rodamina B y naranja de metilo. En adición, algunas investigaciones teóricas han demostrado que el dopaje puede potenciar aún más la efectividad fotocatalítica del compuesto. Bentour *et al.* [11], [8], por ejemplo, mostraron mediante alineación de bandas que el dopaje de átomos de



oxígeno con selenio y telurio mejora significativamente las propiedades relacionadas con la división del agua. Por su parte, Liu *et al.* [12], [8] evaluaron el efecto del dopaje de silicio en distintos sitios del SrTiO_3 , lo que resultó en mejoras ópticas derivadas de la introducción de estados de impureza dentro de la banda prohibida.

En los apartados siguientes, se mencionan diversas formas de producir hidrógeno. Se inicia desde los procesos convencionales y sus clasificaciones, destacando el papel emergente de la fotocatalisis (materiales-perovskitas) como una tecnología prometedora para la producción de hidrógeno.

Hidrógeno

Este elemento es el elemento químico más liviano, con un número atómico de 1 y una masa atómica de 1.0079 u; su capa externa posee un solo protón como núcleo y un electrón en su estado más estable. En forma libre se presenta como molécula diatómica (H_2) altamente combustible [13].

El hidrógeno constituye alrededor del 75 % de la masa del universo, pero aunque abunda en las estrellas y en planetas gigantes gaseosos, raramente se encuentra en su forma aislada, pues tiende a formar enlaces covalentes con otros elementos. Un ejemplo notable es su combinación con oxígeno para formar agua, o con carbono, dando lugar a una amplia variedad de compuestos orgánicos [13]. Además, es reconocido como un combustible limpio y sostenible, con aplicaciones en celdas de combustible, motores, producción química, etcétera. Su alta densidad energética (120.7 MJ/kg) lo convierte en una opción atractiva para las industrias. Sin embargo, producirlo genera dióxido de carbono, que es perjudicial para el medio ambiente [14]. De acuerdo con el tipo de materia prima utilizada y el método, las emisiones de CO_2 asociadas a su vía de producción varían en magnitud; el hidrógeno se clasifica en diferentes categorías según su técnica de extracción [15].

- Hidrógeno verde: Se obtiene del agua a través de la electrólisis [15].
- Hidrógeno azul: Se extrae del gas natural, metano o licuados del petróleo aplicando procesos de reformado [15].
- Hidrógeno gris: Se produce de la misma forma que el hidrógeno azul, a diferencia de que no se usan tácticas para limitar las emisiones de CO_2 [15].
- Hidrógeno negro: Se consigue a partir de carbón, energía nuclear y electricidad de la red (representa el 23 % de la producción mundial) [15].

La ventaja que posiciona al H_2 como una opción combustible prometedora es su elevada densidad energética (120 MJ/kg), casi tres veces superior a la del gas licuado de petróleo (46 MJ/kg) y el diésel (44 MJ/kg) [16]. Además, dicho elemento

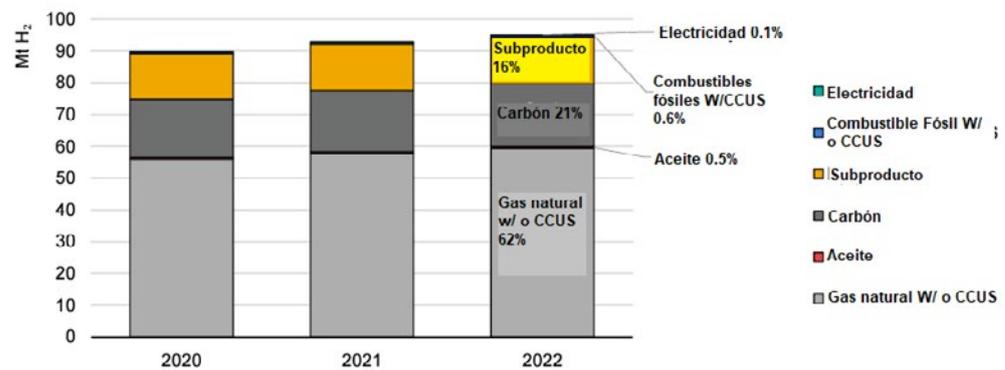


es considerado el portador energético del futuro por tres razones clave: la eficiencia energética, la dependencia energética y el impacto medioambiental. Actualmente, el mercado estriba en los combustibles fósiles, que sufren de dos grandes inconvenientes, pues son recursos no renovables y de distribución geográfica limitada, lo que provoca el aumento de su precio. En ese sentido, con la innovación de tecnologías de extracción de hidrógeno de fuentes renovables se lograría reducir las emisiones de CO_2 de los combustibles fósiles, debido a que el hidrógeno emite vapor de agua no contaminante [17].

Procesos de producción

Dado que el hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza, es necesario obtenerlo mediante la transformación de otras materias primas. La producción mundial alcanzó en 2022 aproximadamente 95 Mt, 3 % superior en comparación con 2021 [18]. En la Figura 1 se presentan las fuentes de hidrógeno explotadas en 2022, y se observa que más de la mitad se extrajo a partir de gas natural. Además, el 70 % del volumen a nivel mundial provino de China, Estados Unidos, Medio Oriente, India y Rusia (en orden descendente) [18].

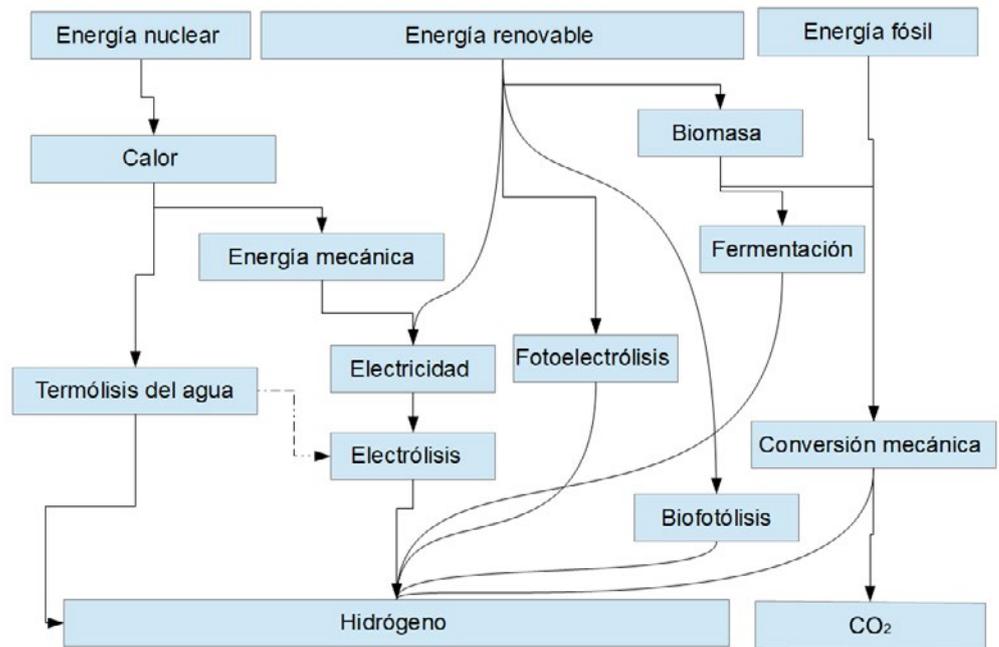
FIGURA 1.
Generación de hidrógeno en 2022 [18].



Afortunadamente, existen múltiples métodos de producción, un ejemplo es la electrólisis, que se lleva a cabo a partir de energía nuclear, eólica o solar. Algo similar ocurre con los procesos de termólisis activados con energía nuclear. La gasificación, por otra parte, se puede aplicar al carbón y la biomasa. Cada método difiere en su impacto ambiental y eficiencia energética; en la Figura 2 se ilustran los sistemas disponibles para recolectar hidrógeno de diversas fuentes [19]. La presente revisión se complementa con representaciones que trazan esquemáticamente los procesos y tecnologías involucrados en dicha labor.



FIGURA 2.
Métodos de producción de hidrógeno. Adaptado de [19].



Procesos de reformado (conversión química)

Se trata de las técnicas más prolíferas para la obtención de hidrógeno. Los procesos de reformado se pueden categorizar en endotérmicos y exotérmicos. Los primeros necesitan calor proveniente de una fuente externa; los segundos lo liberan al producirse la reacción química [19].

- El proceso de reformado de vapor con agua es adaptable a una gama de hidrocarburos y alcoholes. Consiste en mezclar vapor de agua con metano, el componente principal del gas natural, y llevar la mezcla a temperaturas entre 700 y 1000 °C en presencia de un catalizador generalmente a base de níquel. En la reformación primaria se obtiene hidrógeno y monóxido de carbono, pero puede haber una etapa adicional donde el CO y el vapor de agua reaccionan para producir más H₂ y CO₂, conocida como reformación secundaria [19].
- En la oxidación parcial de hidrocarburos, solo el carbono se oxida, dejando el hidrógeno libre; constituye un método químico dedicado a generar *syngas*, compuesto por CO, CO₂, H₂ y CH₄ en diferentes proporciones según la composición de la materia prima y el agente gasificante utilizado (oxígeno, aire, vapor de agua, etc.) [19]. Dicha mezcla es precursora de numerosos procesos industriales, incluyendo la síntesis de metanol e hidrocarburos líquidos a través de la catálisis de Fischer-Tropsch [19].



Procesos de pirólisis

La pirólisis implica la desintegración de un material mediante el calor dentro de un ambiente anaeróbico, con temperaturas de ~450 °C para la biomasa y ~1200 °C para el carbón. Para aislar el hidrógeno interesa controlar la reacción de modo que se libere primero un *syngas*, para después ajustarlo mediante desplazamientos y procesos de purificación [19]. La pirólisis se enfoca en mejorar la eficiencia del proceso, refinar la calidad de los productos y desarrollar catalizadores que dirijan las reacciones hacia productos específicos. También se investiga cómo integrarla con otras tecnologías de conversión de biomasa, como la gasificación y la digestión anaeróbica, para eficientar el consumo de recursos y la producción de energía.

Proceso de gasificación

Consiste en una técnica termoquímica de generación de *syngas* a partir de materiales carbonosos, como la biomasa y algunos residuos industriales o urbanos. Presenta una reducción significativa de emisiones en comparación con la incineración directa de combustibles fósiles. Sin embargo, la inversión inicial es elevada, al igual que los costos operativos, pues es necesario un pretratamiento de los materiales y un manejo de subproductos, alquitranes y cenizas, que pueden ser problemáticos.

Termólisis

La termólisis es un método versátil y eficaz para separar sustancias en sus componentes básicos a través del calor. Su aplicación abre oportunidades para la gestión de residuos y la producción sostenible de materiales y fuentes energéticas. Sin embargo, requiere altas temperaturas y, por lo tanto, un consumo elevado de energía. Asimismo, el manejo de los gases y residuos resultantes puede ser complicado, especialmente si contienen compuestos tóxicos o corrosivos. La termólisis implica la obtención del hidrógeno de hidrocarburos o agua aplicando calor. Bajo esta definición, el reformado, la gasificación y la pirólisis también conforman procesos de termólisis. Se clasifican en dos tipos [19]:



Clase I: ciclos termoquímicos de temperaturas no extremas

- Familia del azufre: Ciclo termoquímico desarrollado en los años 70 que requiere esencialmente dos niveles térmicos, uno a 850 °C para dividir el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y otro de 360 °C aproximadamente para descomponer el yoduro de hidrógeno (HI) [19].
- Ciclo UT-3: Requiere múltiples niveles térmicos, con un máximo de 750 °C. Asimismo, para la extracción del hidrógeno se utilizan membranas que operan bajo presiones atmosféricas [19].

Clase II: conversión química

- Procesos de descarbonización: Se separa el carbono de un hidrocarburo por medio de una mezcla con vapor de agua; emite CO_x [19].
- Reducción de óxidos metálicos: El aislamiento de H_2 mediante la reducción de óxidos metálicos es un proceso que involucra la reacción de un óxido metálico con un agente reductor [19].
- Electrólisis: Consiste en la ruptura de la molécula del agua al aplicarle una corriente eléctrica.
- Fermentación: a partir de biomasa, puede ser alcohólica o anaeróbica [19].

Procesos fotolíticos

También conocida como fotodescomposición, la fotólisis se refiere a la separación química de compuestos por medio de la absorción lumínica. Este tipo de reacciones es fundamental en la química ambiental, la fotoquímica y la tecnología de tratamiento de agua y aire [19].

- Fotobiológicos: Ocurren en organismos vivos y son esenciales para la vida en la Tierra, desde la fotosíntesis en plantas hasta el sentido de la vista en los animales. Involucran principalmente microalgas y bacterias fotosintéticas, que liberan hidrógeno a partir de la luz solar gracias a la enzima hidrogenasa. Las algas verdes, especialmente la *Chlamydomonas reinhardtii*, han sido ampliamente estudiadas por dicha capacidad y se ha observado que, ante el estrés causado por la ausencia de azufre, las algas pueden pasar de segregar oxígeno a hidrógeno. A su vez, las bacterias púrpuras no sulfurosas pueden liberar hidrógeno a través de un proceso similar a la fotosíntesis.
- Foelectroquímicos y fotocatalisis: Los procesos foelectroquímicos llevan a cabo la electrólisis del agua utilizando la energía solar y electrodos se-

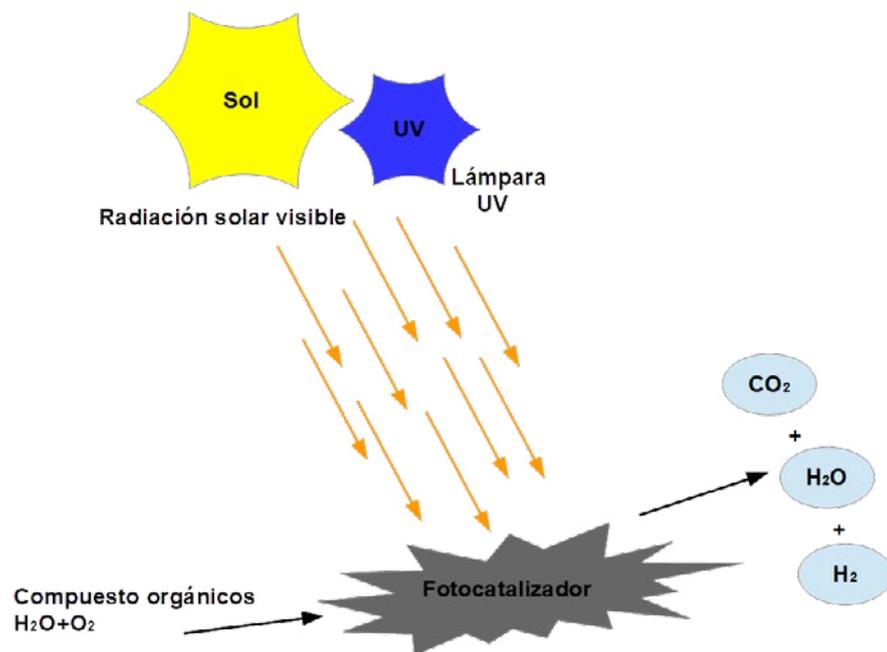


miconductores. La fotocatalisis aprovecha la energía solar a través de materiales semiconductores que operan a diferentes longitudes de onda. Las investigaciones actuales se centran en identificar materiales capaces de disociar el agua y mantener su estabilidad.

Fotocatálisis

Los procesos fotocatalíticos, desarrollados en 1972 por Fujishima y Honda [3], también emplean materiales semiconductores en presencia de energía solar para la obtención de hidrógeno a partir del agua [20] (Figura 3). Los semiconductores cuentan con una banda de valencia (BV), ocupada por electrones, y una banda de conducción (BC), donde existen huecos. Cuando estos materiales absorben luz con energía igual o mayor que su brecha prohibida (*band gap*), se movilizan los electrones desde la BV hasta la BC, creando así los pares electrón-hueco (Figura 4) mismos que son cruciales en las reacciones redox y la generación de corriente eléctrica en un material [21]. Los electrones en la banda de conducción facilitan las reducciones en especies químicas, mientras que los huecos en la banda de valencia oxidan otras especies. El mecanismo difiere de los procesos fotoelectroquímicos en que prescinde de electrodos.

FIGURA 3.
Esquema representativo de la fotocatalisis. Adaptado de [26].

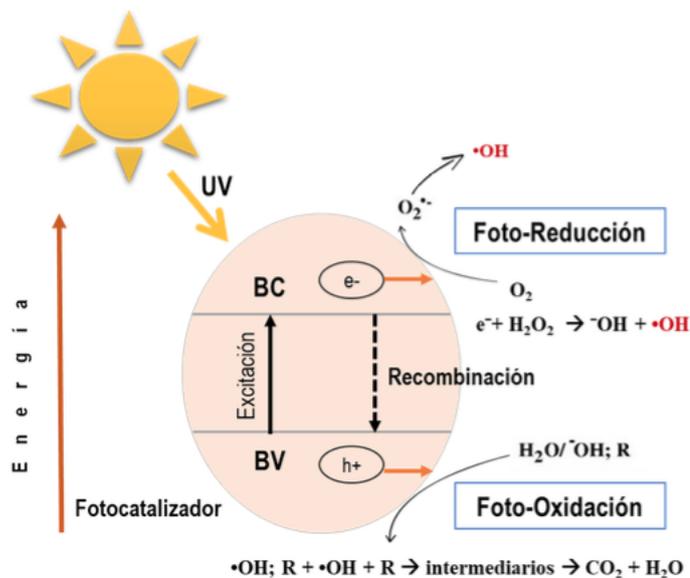




Materiales semiconductores/obtención de hidrógeno

Los semiconductores producen partículas con carga eléctrica, electrones y huecos, cuando el material es expuesto a cierto umbral de energía. Dichas partículas migran a la superficie del fotocatalizador, donde reaccionan energéticamente y logran degradar contaminantes (Figura 4), producir hidrógeno, etc. También puede suceder que se recombinen antes de llegar a la superficie del material, lo que libera calor y disminuye la eficiencia fotocatalítica [22]. Por otro lado, el material no debe generar toxicidad pero mantener una extensa área activa para incrementar dicha eficiencia [21]. Para no degradarse durante el proceso, un semiconductor depende de la energía a la cual se activa y su propia naturaleza química; por ejemplo, hay semiconductores, como dióxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO) y trióxido de tungsteno (WO_3), que solo responden al rango UV, el cual representa una fracción pequeña de la luz solar.

FIGURA 4.
Esquema representativo del proceso de obtención de hidrógeno [26].



Asimismo, la formación de heterouniones ha permitido mejoras en el desempeño fotocatalítico de dichos materiales al prevenir la recombinación del par electrón-hueco. Para lograrlo, los materiales semiconductores pueden ser modificados al introducirles impurezas (nanopartículas metálicas), para que aprovechen mejor los espectros visible e infrarrojo; este proceso denominado *dopaje* extiende la vida media de los pares electrón-hueco [23], [24].

Los materiales tipo perovskita tienen un potencial prometedor en la fotocatálisis debido a sus propiedades únicas: estabilidad química, óptica, estructura cristalina y vida media del par electrón-hueco. Se trata de compuestos con fórmula química ABX_3 (Tabla 1), donde A es un catión de mayor tamaño, B es un catión de menor



tamaño y x_3 es un anión que une A con B. En términos de cristalografía, exhibe una estructura cúbica [25], pero también otras, como la tetragonal, ortorrómbica, romboédrica y hexagonal. La forma del arreglo cristalino depende de la temperatura de calcinación, la presión, la composición química y los defectos estructurales producidos por el dopaje o el método de síntesis [21].

TABLA 1.

Elementos que pueden conformar una perovskita con fórmula química ABX_3 [25].

ABX ₃		
CATIÓN MAYOR A	CATIÓN MENOR B	ANIÓN X ₃
Sr	Ti	O
Ca	Zn	F
Ba	Fe	Cl
Rb	Cu	Br
CS	Ni	I

Las perovskitas pueden doparse con oro, plata, platino, paladio y otros elementos (Tabla 3), creando sistemas cuyas propiedades plasmónicas, catalíticas y conductoras superan las limitaciones de los componentes individuales al interactuar con la luz [27]. En este contexto, las NP se excitan mediante la resonancia superficial del plasmón, un proceso que se activa por las oscilaciones electrónicas en la banda de conducción de los metales nobles al recibir luz visible [27], [28], [29].

TABLA 2.

Fotocatalizadores plasmónicos de metal-semiconductor típicos para una variedad de aplicaciones en fotocatalisis [41].

SEMICONDUCTORES METÁLICOS PLASMÓNICOS	APLICACIONES EN FOTOCATÁLISIS	AÑO DE PUBLICACIÓN
Au-TiO ₂	Oxidación fotocatalítica de etanol y metanol; celdas de combustible fotovoltaicas	2005
Ag/SiO ₂ -TiO ₂	Descomposición de MB	2008
Au@CeO ₂	Oxidación del alcohol bencílico a benzaldehído	2014



SEMICONDUCTORES METÁLICOS PLASMÓNICOS	APLICACIONES EN FOTOCATÁLISIS	AÑO DE PUBLICACIÓN
Au/ZnO	Degradación del tinte MO	2016
Au/Cu ₂ O/Pt	División del agua	2018
Cadena Au@Zn _{0.67} Cd _{0.33} S	Evolución fotocatalítica del hidrógeno	2019
ZnO-CuO dopado con Cu	Fotodescontaminación de efluentes textiles	2020
Mg/MgO	Remediación ambiental SF ₆	2020
Bi/α-MnS/Bi ₂ MOO ₆	Reducción de CO ₂	2021
Ag/BiFeO ₃ fibroso	Conversión de energía fotoelectroquímica	2021
SiO ₂ -Au-Pt	Degradación de MB	2021
Ag/BiVO ₄	Fotodegradación de rodamina B	2022
AUNBP@Cu ₂ O	Tratamiento del cáncer de mama	2023
Bi/TiO ₂	Reducción de CO ₂	2024

La aplicación a gran escala de semiconductores fotocatalíticos enfrenta ciertos retos. Por ejemplo, el dióxido de titanio (TiO₂) goza de estabilidad química, no toxicidad, alta reactividad, inercia química y biológica, fotoestabilidad y gran longitud de difusión electrónica [30], [31], [32]; no obstante, su rápida recombinación limita el rendimiento, ya que alrededor del 90 % de los electrones y huecos fotogenerados se recombinan por vías no radiativas, formando fonones [33], [34]. De igual modo, el disulfuro de molibdeno (MoS₂) presenta movilidad de portadores de carga y propiedades de absorción óptica, pero al igual que otros materiales fotocatalíticos enfrenta el obstáculo de la recombinación acelerada de los pares electrón-hueco [33].

Aunque no se ha desarrollado una estrategia óptima para mitigar la recombinación, se han llevado a cabo investigaciones para lograrlo mediante la modificación de los atributos fotoeléctricos, electrónicos y morfológicos de los semiconductores. Algunos ejemplos se presentan en la Tabla 3, donde se describe brevemente en qué consiste cada trabajo y la cantidad de H₂ que han obtenido al efectuar las pruebas fotocatalíticas.

TABLA 3.

Investigaciones relacionadas con materiales semiconductores fotocatalíticos para la obtención de H₂.

AUTORES	INVESTIGACIÓN	RESULTADOS
Long Wang y otros, 2022 [34]	Rendimiento de producción de hidrógeno de srTiO ₃ codopado con ce/N activo para la división fotocatalítica del agua	La tasa de separación de agua del srTiO ₃ dopado con ce/N es de 4.28 mmol/g/h.
Zhijia Li y otros, 2023 [35]	Síntesis inducida por redox de srTiO ₃ /α-Fe ₂ O ₃ para una producción de hidrógeno muy mejorada	La tasa de producción de hidrógeno y el rendimiento alcanzaron 9.8 mmol/g/h y 235.2 μmol.
Bentour, H y otros, 2022 [36]	Estudio DFT de srTiO ₃ codopado con se/Mn y Te/Mn para la producción fotocatalítica de hidrógeno con luz visible	El codopaje con telurio/manganeso reduce significativamente el <i>band gap</i> , aproximadamente 1.61 eV.
Liuyang Z. y otros, 2021 [33]	Mejora del rendimiento de la producción fotocatalítica de hidrógeno de srTiO ₃ mediante el recubrimiento con un poloxámero hidrófilo	La producción fotocatalítica de hidrógeno de P123@srTiO ₃ alcanza hasta 4.02 mmol/g/h en ausencia de cocatalizador.
N. Gnanaseelan y otros, 2020 [37]	Síntesis de compuestos MoS ₂ -TiO ₂ -óxido de grafeno reducido (MTG) y ceO ₂ -ce ₂ Ti ₃ O _{8.7} -TiO ₂ -óxido de grafeno reducido e incorporando nanopartículas de Mo y ce	La presencia del grafeno impulsó la producción H ₂ , obteniendo en MTG y CTG 363.83 μmol/g/h y 355.9 μmol/g/h. Aumentó efectivamente la fotogeneración de H ₂ .
J. Enrique y otros, 2021 [38]	Síntesis y caracterización del material híbrido g-C ₃ N ₄ /Nis, y su comportamiento fotocatalítico para la producción de H ₂	Tras 4 horas de irradiación uv se tiene un rendimiento de H ₂ con el fotocatalizador híbrido g-C ₃ N ₄ /Nis propuesto de 1230 mmol H ₂ /h.
Xinru Li Yao Ning Bai y otros, 2024, [39]	Implantación de nanocubos de plata uniformemente dispersos (35 nm) en srTiO ₃	El Ag@srTiO ₃ tiene una tasa de reducción de hidrógeno de hasta 457.5 μmol/g/h bajo luz solar simulada.
Meng Liu y otros, 2024, [40]	Nanopartículas (NP) de Au decoradas con material hueco poroso srTiO ₃ rico en defectos de oxígeno utilizando un método hidrotérmico asistido por grabado ácido	Se logró una eficiencia de producción de hidrógeno de 850 μmol/g/h con un 7.2 % bajo irradiación infrarroja cercana.

La ingeniería de nuevos materiales semiconductores y la modificación de los ya existentes mediante técnicas como el dopaje, la formación de heteroestructuras o el uso de cocatalizadores para mejorar la eficiencia, la estabilidad y la capacidad de aprovechar la luz solar es un campo de investigación emergente prometedor dada la diversidad de aplicaciones potenciales. Los datos presentados en las Tablas 2 y 3 muestran que la modificación de los semiconductores resulta en un incremento significativo en la producción de hidrógeno, así como en su eficiencia para diversas aplicaciones.



Conclusiones

El hidrógeno se presenta como una alternativa viable en la búsqueda de fuentes de energía limpias y renovables, con un potencial considerable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales. En este contexto, los materiales semiconductores fotocatalíticos, particularmente las perovskitas, han emergido como una innovación prometedora para la producción de hidrógeno a través de la división de la molécula de agua. Dicho compuesto destaca por su alta absorción de luz y sus propiedades electrónicas ajustables, conformándose como una opción atractiva para la fotocatalisis. Las modificaciones estructurales y químicas, como el control de defectos cristalinos o el dopaje con metales, pueden mejorar aún más su estabilidad bajo condiciones de reacción y su eficiencia al generar portadores de carga. No obstante, persisten desafíos que deben superarse para alcanzar su máximo potencial y asegurar una implementación práctica y sostenible. Entre estos retos se incluyen la optimización de la estabilidad, la minimización de la recombinación de portadores de carga, e incluso la síntesis para obtener los materiales tipos perovskitas. Por lo tanto, los avances en la investigación de materiales, incluyendo el desarrollo de nuevas perovskitas, y la ingeniería de procesos son cruciales para mejorar la eficiencia y estabilidad de los semiconductores fotocatalíticos, facilitando así su aplicación en la producción a gran escala de hidrógeno.

Referencias

- [1] J. A. Turner, "A Realizable Renewable Energy Future", *Science*, vol. 305, núm. 5686, pp. 972-974, 2004, doi: 10.1126/science.285.5428.687
- [2] G. A. Rivera Vargas, Y. Matsumoto-Kuwabara y R. Baquero Parra, "Análisis para la obtención de hidrógeno a partir de biogás proveniente de la fermentación de bebidas naturales", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, núm. 2, pp. 251-256, 2016, doi: 10.1016/j.riit.2016.06.009
- [3] A. Fujishima y K. Honda, "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode", *Nature*, vol. 238, núm. 5358, pp. 37-38, 1972, doi: 10.1038/238037a0
- [4] R. S. Dirzo y R. S. Casarín, "Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine", *Educ. Quím.*, vol. 20, núm. 2, pp. 176-181, 2009, doi: 10.1016/S0187-893X(18)30024-7
- [5] Q. Wang *et al.*, "Scalable water splitting on particulate photocatalyst sheets with a solar-to-hydrogen energy conversion efficiency exceeding 1%", *Nature Materials*, vol. 15, núm. 6, pp. 611-615, 2016, doi: 10.1038/nmat4589
- [6] X. Chen, S. Shen, L. Guo y S. S. Mao, "Semiconductor-based photocatalytic hydrogen generation", *Chemical Reviews*, vol. 110, núm. 11, pp. 6503-6570, 2010, doi: 10.1021/cr1001645
- [7] L. F. G. Giraldo, E. A. M. Franco y J. J. S. Arango, "La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales", *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 1, núm. 1, pp. 83-92, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69511013.pdf>.
- [8] S. A. Azevedo, J. A. S. Laranjeira, J. F. Silva, E. Longo y J. R. Sambrano, "Ag-doped SrTiO₃: Enhanced water splitting for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 79, pp. 199-207, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.311
- [9] Su Z., F. Fang, X. Li, W. Han, X. Liu y K. Chang, "Synergistic surface oxygen defect and bulk Ti³⁺ defect engineering on SrTiO₃ for enhancing photocatalytic overall water splitting", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 626, pp. 662-673, 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2022.06.109
- [10] M. A. Kafeshani, V. Mahdikhah, y S. Sheibani, "Facile preparation and modification of SrTiO₃ through Ni-cd co-doping as an efficient visible-light-driven photocatalyst", *Optical Materials*, vol. 133, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.113080



- [11] H. Bentour, M. Boujnah, M. Houmad, M. El Yadari, A. Benyoussef y A. El Kenz, "DFT study of Se and Te doped SrTiO_3 for enhanced visible-light driven photocatalytic hydrogen production", *Optics and Quantum Electronics*, vol. 53, pp. 1-13, 2021, doi: 10.1007/s11082-021-03214-1
- [12] Y. L. Liu, C. L. Yang, M. S. Wang, X. G. Ma y Y. G. Yi, "Theoretical insight into the effect of Si-doped sites on the photocatalytic properties of SrTiO_3 ", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 125, pp. 1-9, 2019, doi: 10.1007/s00339-019-2668-8
- [13] A. Hernández Fernández, "Desarrollo de un prototipo para la monitorización de parámetros ambientales mediante sensores inalámbricos", Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2023. [En línea]. Disponible: https://oa.upm.es/75295/1/TFG_ADRIAN_HERNANDEZ_FERNANDEZ.pdf.
- [14] Z. Chu, W. Zhao, D. Xu, W. Liu, K. Han, Z. He y Y. Li, "The catalytic decomposition of CH_4 using ce-doped $\text{Fe}/\text{CaO}-\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ catalyst and its regeneration performance for H_2 production", *Separation and Purification Technology*, vol. 310, art. 129670, 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2023.129670
- [15] P. Porto Mato, "Descarbonización del sector del transporte en España con el hidrógeno verde", Trabajo de fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, 2021. [En línea]. Disponible: https://oa.upm.es/68685/1/TFG_PEDRO_PORTO_MATO.pdf.
- [16] N. Al Amri, A. Naquash, J. Haider y M. A. Qyyum, "A process efficiency enhancement of integrated H_2 liquefaction followed by CO_2 solidification: A 3E's analysis-Energy, Exergy, and Economic", *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 192, pp. 340-357, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.09.102
- [17] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Sora, *El hidrógeno y la energía*, Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, 2007. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=285044>.
- [18] International Energy Agency (IEA), *Global Hydrogen Review 2023*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
- [19] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Soria, *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, 2007. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=285044>.
- [20] K. Jiménez Rangel, J. E. Samaniego Benítez, L. Lartundo Rojas, H. A. Calderón y A. Mantilla, "Ternary $\text{g}-\text{C}_3\text{N}_4/\text{NiOOH}/\text{Ag}$ nanocomposite photocatalyst with efficient charges separation and high activity for H_2 production", *Fuel*, vol. 280, art. 118672, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118672
- [21] J. D. B. Ruiz, "Producción de hidrógeno e hidrocarburos de cadena corta renovables mediante fotocatalisis", Tesis de doctorado, UAQ, Querétaro, México, 2023. [En línea]. Disponible: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2644>.
- [22] M. Trejo, "Síntesis de fotocatalizadores soportados de óxido de tungsteno por el método de sol-gel y su aplicación en la degradación de colorantes", Tesis de maestría, CICATA-Querétaro, Querétaro, México, 2019. [En línea]. Disponible: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/30306/Maria%20Guadalupe%20Trejo%20Perez.pdf>.
- [23] R. J. Candal, S. A. Bilmes y M. A. Blesa, "Semiconductores con actividad fotocatalítica", en *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, M. I. Litter, Ed., Madrid: CIEMAT, 2004, pp. 79-101. [En línea]. Disponible: <https://psa.es/en/units/stw/projects/solwater/files/CYTED01/10cap04.pdf>.
- [24] Y. Jiménez Flores, K. Jiménez Rangel, J. E. Samaniego Benítez, L. Lartundo Rojas, H. A. Calderón, R. Gómez y A. Mantilla, "Novelty $\text{g}-\text{C}_3\text{N}_4/\text{HAP}$ composite as highly effective photocatalyst for Cr(VI) photoreduction", *Catalysis Today*, vol. 388, pp. 168-175, 2022, doi: 10.1016/j.cattod.2020.07.045
- [25] Y. W. Teh, M. K. T. Chee, X. Y. Kong, S. T. Yong y S. P. Chai, "An insight into perovskite-based photocatalysts for artificial photosynthesis", *Sustainable Energy and Fuels*, vol. 4, núm. 3, pp. 973-984, 2020, doi: 10.1039/c9se00526a
- [26] R. E. Cohen, "Origin of ferroelectricity in perovskite oxides", *Nature*, vol. 358, núm. 6382, pp. 136-138, 1992, doi:10.1038/358136a0
- [27] Y. Zhang, W. Xu, B. Zhang, J. Xu y G. Zhu, "Enhanced photocatalytic performance of TiO_2 loaded with Ag nanoparticles under visible light irradiation", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, núm. 10, pp. 8233-8240, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.10.188
- [28] J. C. Duran Álvarez, E. Avella y R. Zanella, "Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos", *Revista interdisciplinaria en nanociencia y nanotecnología*, 2020, doi: 10.22201/cei-ich.24485691e.2015.14.52510
- [29] F. E. Ahmed, R. Hashaikeh y N. Hilal, "Solar powered desalination - Technology, energy and future outlook", *Desalination*, vol. 453, pp. 54-76, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2018.12.002
- [30] J. Schneider *et al.*, "Understanding TiO_2 photocatalysis: mechanisms and materials", *Chem. Rev.*, vol. 114, pp. 9919-9986, 2014, doi: 10.1021/cr500189z
- [31] A. R. Khataee y M. B. Kasiri, "Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide: influence of the chemical structure of dyes", *J. Mol. Catal. A Chem.*, vol. 328, pp. 8-26, 2010, doi: 10.1016/j.molstruc.2019.127115
- [32] Q. Guo, C. Zhou, Z. Ma y X. Yang, "Fundamentals of TiO_2 photocatalysis: concepts, mechanisms, and challenges", *Adv. Mater.*, 2019, doi: 10.1002/adma.201901997
- [33] Z. Li, X. Meng y Z. Zhang, "Recent development on MoS_2 -based photocatalysis: a



- review", *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, vol. 35, pp. 39-55, 2018, doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2017.12.002
- [34] L. Wang *et al.*, "Hydrogen production performance of active ce/n co-doped sr₂ti₃o₇ for photocatalytic water splitting", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, núm. 92, pp. 39047-39057, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.076
- [35] Z. Li *et al.*, "Interface redox-induced synthesis of sr₂ti₃o₇/α-Fe₂O₃ for much improved hydrogen production", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 963, art. 171189, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.171189
- [36] H. Bentour, K. Belasfar, M. Boujnah, M. El Yadari, A. Benyoussef y A. El Kenz, "DFT study of se/mn and te/mn codoped sr₂ti₃o₇ for visible light-driven photocatalytic hydrogen production", *Optical Materials*, vol. 129, art. 112431, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112431.
- [37] L. A. G. E. Vento Lujano, "Defect-induced modification of band structure by the insertion of ce³⁺ and ce⁴⁺ in sr₂ti₃o₇: A high-performance sunlight-driven photocatalyst", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 857, art. 157602, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151044
- [38] J. E. Samaniego Benítez, K. Jiménez Rangel, L. Lartundo Rojas, A. García García y A. Mantilla, "Enhanced photocatalytic H₂ production over g-c₃n₄/nis hybrid photocatalyst", *Materials Letters*, vol. 290, art. 129476, 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2021.129476
- [39] X. Li *et al.*, "Monodisperse silver nanocubes composite Ag@c/sr₂ti₃o₇ photocatalytic decomposition of water for hydrogen reduction", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 325, art. 129746, 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129746
- [40] M. Liu *et al.*, "Au nanoparticles decorated sr₂ti₃o₇-x hollow structure for plasmonic enhanced hydrogen production in UV-visible and near-infrared region", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 983, art. 173859, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.173859
- [41] T. Kong *et al.*, "Recent advances and mechanism of plasmonic metal-semiconductor photocatalysis", *Rsc Advances*, vol. 14, núm. 24, pp. 17041-17050, 2024, doi: 10.1039/D4RA02808B



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

 perspectivasci@uaq.mx

REVISTA INCLUIDA EN:



VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

 **DESPACHO DE
PUBLICACIONES**

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERETARO**
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA