

Análisis crítico de los materiales utilizados en la obtención de electrodos para la generación de hidrógeno verde, por medio de la electrólisis del agua: estado del arte

Jhon Freddy Rodriguez Madariaga

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

PhD. En Electrochemistry

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingeniería Físicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Materiales

Bucaramanga

2024

DEDICATORIA

A Dios, por todas las oportunidades y bendiciones dadas, por su misericordia y su constante acompañamiento y protección. A mis padres Amaide Madariaga Pino y Freddy Alfonso Rodríguez Minorta, quienes son mi motor, mis amigos y quienes han dado todo de sí, para que yo pueda lograr mis aspiraciones. En ellos encuentro todo el amor y apoyo que una persona pueda tener. A ellos mi infinita gratitud. A mis abuelos Teresa Minorta (Q.E.P.D.), Ilva Rosa, Luis José, por ese gran amor brindado. Así como al resto de mis familiares de quienes recibo muestras de amor y apoyo constante. A mi amigo el padre Jorge Escudero y su familia por su continuo acompañamiento y motivación, así como por hacerme sentir un miembro más de su núcleo familiar. A mis amigos, profesores y todas aquellas personas que han dejado una semilla en mi formación personal y profesional. Que han estado ahí para brindarme su apoyo en situaciones adversas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, quien es mi sustento y compañía en todo momento, quien puso las oportunidades y personas adecuadas para hacer de este proyecto una realidad. Así como a mis padres quienes me apoyan incondicionalmente en la realización de todas mis metas y sueños. Igualmente, al profesor Sergio I. Blanco Vásquez, por haber depositado su confianza en mí, por la dedicación con que me brindó y sus orientaciones para lograr un buen desarrollo del presente trabajo.

Finalmente doy gracias a toda mi familia y amigos, que me han acompañado en cada uno de los años de mi formación profesional y por todos los momentos vividos en este tiempo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	7
1. Objetivos.....	9
1.1. Objetivo General.....	9
1.2. Objetivos Específicos.....	9
2. Antecedentes.....	10
2.1. Procesos Electroquímicos.....	10
2.2. Procesos Fotoelectroquímicos.....	12
3. Metodología.....	14
3.1. Revisión del Bibliográfica.....	14
3.2. Identificar y clasificar la información.....	14
3.3. Categorizar los materiales.....	14
3.4. Análisis de Factibilidad y Aplicabilidad.....	15
4. Resultados y discusión.....	16
5. Conclusiones.....	46
6. Recomendación.....	46
Referencias bibliográficas.....	47

Lista de Tablas

	<i>Pág.</i>
<i>Tabla 1. Artículos sobre los electrodos utilizados en la producción de Hidrógeno por medio de procesos electroquímicos y sus materiales.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Artículos sobre electrodos utilizados en la producción de Hidrógeno por medio de procesos Fotoelectroquímicos.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Propiedades de los materiales evaluados en los diferentes estudios.....</i>	<i>41</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Esquema de una celda electroquímica.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Esquema de una celda fotoelectroquímica.....</i>	<i>13</i>

Introducción

El cambio climático es un problema global que afecta a todo el planeta. Una de las principales causas del cambio climático son las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas, para generar energía. Sin embargo, las energías renovables son un factor clave en la lucha contra el cambio climático, ya que su uso permite reducir las emisiones y promueve la transición hacia un modelo energético más sostenible y limpio, ya que esta generación de energías renovables produce menos emisiones que la quema de combustibles fósiles (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2023).

Ahora bien, en Colombia, la situación energética es compleja debido a su dependencia del carbón y del petróleo, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), en 2019, el 70,7% de la energía generada en el país proviene de combustibles fósiles, mientras que sólo el 0,2% correspondía a fuentes renovables no convencionales (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2023). Esto genera una gran preocupación por la contaminación ambiental y la seguridad energética del país, en este contexto, el hidrógeno se presenta como una alternativa prometedora en la búsqueda de una fuente de energía limpia y renovable.

Sin embargo, la forma más sostenible de producir hidrógeno es mediante la electrólisis del agua utilizando energías renovables, como la solar o eólica, a este proceso se le conoce como hidrólisis del agua y es una de las tecnologías clave en la transición energética. El hidrógeno se puede utilizar como combustible en diversas aplicaciones, como en vehículos de combustión interna o en células de combustible, es por esto que, el Grupo Ecopetrol inició la producción de hidrógeno verde en la Refinería de Cartagena, el proyecto tiene por objetivo evaluar la viabilidad técnica y ambiental de este vector energético, con esto se espera una producción de hidrógeno

verde de alta pureza (99,999%), se realizará con un electrolizador y 270 paneles solares, Ecopetrol presentó su plan estratégico de hidrógeno de bajo carbono, que tendrá proyectos por un valor de US\$2.500 millones al año 2040, con esto se espera que Colombia sea pionera y líder en la producción y exportación de hidrógeno verde para el año 2032 (Ecopetrol, 2022). Además, el hidrógeno también se puede utilizar como materia prima en la producción de productos químicos, como fertilizantes o plásticos. Por ende, uno de los principales desafíos es el desarrollo de electrocatalizadores eficientes y económicos para la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua.

Después de investigar sobre este tipo de alternativas para reducir el efecto invernadero, en este trabajo se buscará analizar críticamente la literatura actualizada referente a los materiales utilizados en la creación de electrodos para la producción de hidrógeno verde, por medio de la electrólisis del agua.

1. Objetivos

1.1.Objetivo General

Analizar los materiales que son utilizados en la obtención de electrodos, para la generación de hidrógeno verde por medio de electrólisis del agua.

1.2.Objetivos Específicos

Identificar los materiales utilizados en electrodos para generar hidrógeno verde, por medio de la electrólisis del agua

Categorizar los electrodos por medio de sus propiedades físicas y químicas, especialmente en factores como la eficiencia catalítica, la durabilidad, el costo y la abundancia de los materiales utilizados

Evaluar la factibilidad y aplicabilidad de los materiales utilizados en crear los electrodos, con el propósito de determinar los mejores para lograr una posible escalabilidad industrial.

2. Antecedentes

2.1. Procesos Electroquímicos

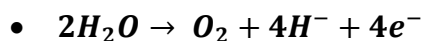
Un proceso electroquímico como la división del agua ha sido ampliamente investigado para la conversión de energía eléctrica en combustible. Existen dos métodos que son los más utilizados con este propósito; la electrolisis del agua y el uso de pilas de combustible (Ji et al., 2020). La reducción del agua o reacción de evolución de hidrógeno (HER) es una de las formas más prometedoras de producir hidrógeno. Sin embargo, es una reacción termodinámicamente cuesta arriba y, por tanto, necesita energía externa como la electricidad para promover la reacción.

Estos procesos se llevan a cabo en una celda electroquímica, las cuales generalmente funcionan mediante la electrolisis del agua. En estas celdas, el agua se descompone en oxígeno e hidrógeno utilizando electricidad, está compuesta por tres partes principales: ánodo, el cual es el electrodo donde ocurre la oxidación; cátodo, electrodo donde ocurre la reducción y electrolito, medio conductor que permite el paso de iones entre el ánodo y el cátodo (Armijo, 20018), como se muestra en la **Figura 1**.

Reacciones involucradas

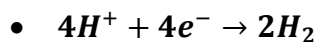
- Ánodo:

Ecuación 1



- Cátodo:

Ecuación 2



Ventajas

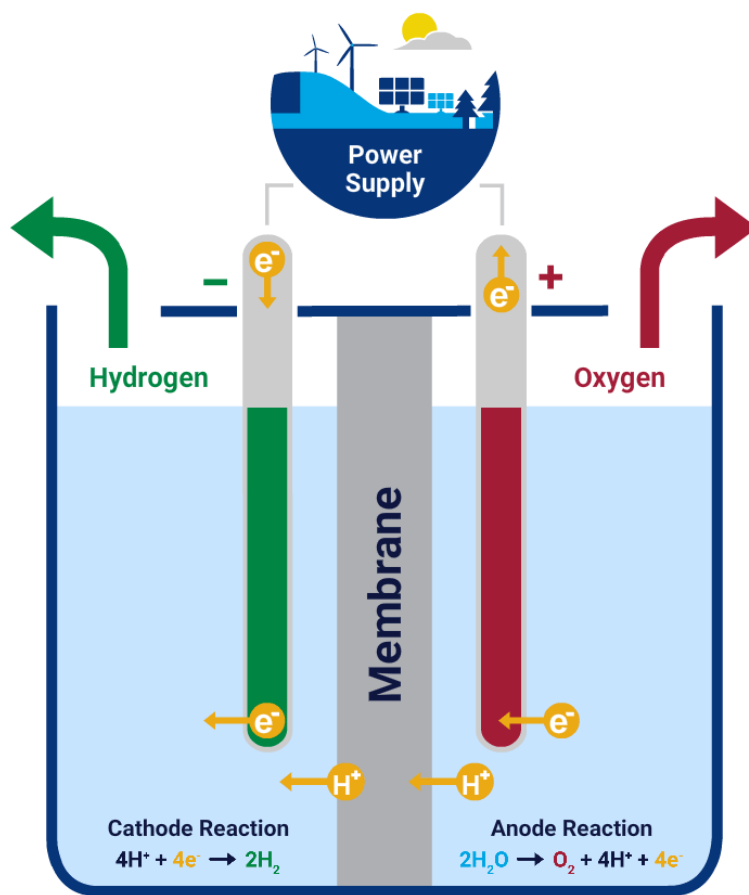
- Eficiencia energética
- Operación continua
- Se pueden utilizar diferentes fuentes de energía, como solar o eólica

Desventajas

- Necesidad de catalizadores Costosos
- Problemas de corrosión
- Dependencia de la calidad del agua

Figura 1.

Esquema de una Celda Electroquímica



Tomado de: (Forecasting, 2020)

2.2. Procesos Fotoelectroquímicos

La fotosíntesis artificial consiste en la división fotoelectroquímica (PEC) del agua en hidrógeno y oxígeno con la ayuda de la luz solar y un fotocatalizador adecuado. Existen dos métodos principales, la electrólisis del agua y la separación directa del agua por la acción de la luz solar, además se tiene conocimiento de más métodos basados en procesos fotoquímicos y biológicos, como la fermentación anaeróbica de residuos o la electrólisis microbiana (Singh et al., 2015). La visión de unas celdas de separación de agua eficientes y de bajo coste están aún lejos de ser una solución económicamente viable, debido principalmente a la no disponibilidad de materiales semiconductores que poseen una elevada actividad PEC y estabilidad química en condiciones adversas (Ramón Manuel Fernandez Domene, 2018).

Para este tipo de proceso se utiliza una celda fotoelectroquímica, estas celdas utilizan la luz solar para generar la corriente eléctrica necesaria para la electrólisis del agua, incluyen un fotoánodo sensible a la luz que inicia la reacción, un semiconductor en el fotoánodo absorbe la luz solar y crea pares hueco-electrón (Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales, 2020). Los electrones fluyen hacia el cátodo, donde reducen los protones para formar hidrógeno, como se muestra en la **Figura 2**.

Partes de la Celda Fotoelectroquímica:

Fotoánodo: Absorbe la luz solar y facilita la generación de pares de electrones-agujeros.

Cátodo: Similar a la celda electroquímica, cataliza la reducción de protones para formar hidrógeno.

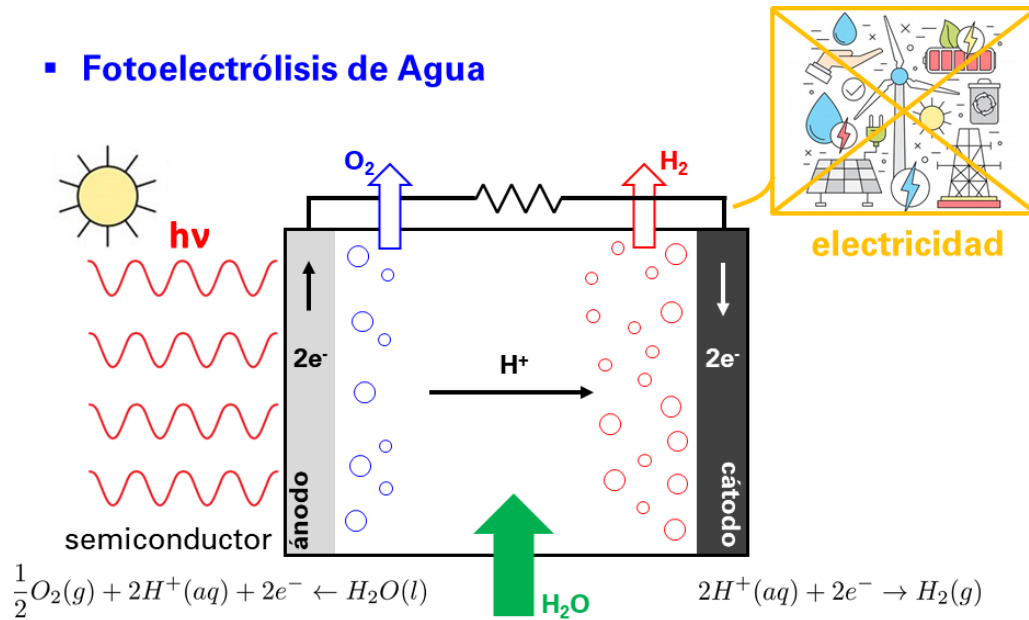
Electrolito: Facilita el transporte de electrones entre el fotoánodo y el cátodo.

Limitaciones: Materiales fotosensibles caros: La eficiencia de conversión a menudo se ve limitada por el costo de los materiales.

Estabilidad a largo plazo: Algunos materiales fotoactivos pueden degradarse con el tiempo debido a la exposición a la luz y otros factores ambientales.

Figura 2.

Esquema de una celda Fotoelectroquímica



Tomado de: (Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales, 2020)

Ambos métodos y tipos de celdas son áreas activas de investigación en busca de mejoras en eficiencia, durabilidad y costos para avanzar en la producción de hidrógeno verde como fuente de energía sostenible.

3. Metodología

Con base en los objetivos propuestos en este proyecto, en este trabajo de grado se realizó un análisis crítico del estado del arte en el tema. El estudio se llevó a cabo, siguiendo la siguiente metodología.

3.1.Revisión del Bibliográfica

Se consultaron y realizó una búsqueda en las bases de datos de disponibles en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, incluyendo revistas científicas y libros relevantes, con el fin de identificar los principales estudios y así obtener una comprensión sobre el avance de los materiales evaluados para la creación de electrocatalizadores utilizados en la producción de hidrógeno verde por medio de la electrólisis del agua.

3.2.Identificar y clasificar la información

Utilizando el programa Mendeley para el manejo y organización de referencias, se realizó una identificación y clasificación del material científico encontrado en la revisión bibliográfica. Organizando las diferentes publicaciones en función de los distintos materiales utilizados en estudios para crear electrocatalizadores que sirvan en la producción de hidrógeno verde, por medio de electrólisis del agua y poder abordar los datos necesarios para cumplir cada uno de los objetivos planteados. Con base en eso, la información recopilada se dividió en dos procesos importantes; Procesos Electroquímicos y Procesos Foelectroquímicos.

3.3.Categorizar los materiales

Luego de seleccionado el material científico para realizar el trabajo, se empezó a categorizar críticamente por materiales y determinar si el proceso es electroquímico o fotoelectroquímico, según sus propiedades físicas y químicas, teniendo en cuenta específicamente la eficiencia catalítica, el costo, durabilidad y la abundancia de dichos materiales

utilizados para sintetizar los electrocatalizadores.

3.4. Análisis de Factibilidad y Aplicabilidad

Por medio de análisis cualitativos (matrices FODA o cuadros comparativos) y por análisis cuantitativos (gráficos y tablas), se buscó evaluar críticamente la factibilidad, aplicabilidad y escalabilidad de estos electrocatalizadores sintetizados, en los diferentes estudios encontrados en la revisión bibliográfica para producir hidrógeno verde, brindando así una recomendación hacia donde enfocar investigaciones venideras sobre este tema de interés que es la energía renovable y llegar a niveles industriales.

4. Resultados y discusión

Considerando que los materiales para la fabricación de las celdas presentan diferentes propiedades fisicoquímicas, dependiendo del funcionamiento de la celda, los artículos obtenidos se clasificaron en función del proceso: procesos electroquímicos y procesos fotoelectroquímicos.

Hasta ahora, los metales preciosos y sus aleaciones son los catalizadores más avanzados (como Pt, Pd e Ir) para promover la generación electrocatalítica de hidrógeno y oxígeno (Ji et al., 2020). Además, los fosfuros avanzados basados en Ir han mostrado en los diferentes estudios un alto rendimiento para HER y, al mismo tiempo, reducen la dosis de metales nobles. Pero, su elevado coste y escasez suponen grandes limitaciones para su comercialización y viabilidad a gran escala. Por lo tanto, el material estudiado se basa en electrocatalizadores que prometen algunas alternativas rentables, incluyendo sulfuros, fosfuros, compuestos de metales de transición, entre otros (Ji et al., 2020).

Tabla 1.

Artículos sobre los electrodos utilizados en la producción de Hidrógeno por medio de procesos electroquímicos y sus materiales

Nombre	Autores	Año	Electrodo	Observación
NiCoP 1D nanothorns grown on 3D hierarchical porous Ni films for high performance hydrogen evolution reaction	Yaqiang Ji, Jinqi Xie, Ying Yang, Xianzhu Fu, Rong Sun, Chingping Wong	2020	Ni/NiCoP	El excelente rendimiento HER del Ni/NiCoP se debe a su ventajosa estructura y composición química, que puede mejorar la conductividad eléctrica y el transporte de electrones
Construction of multi-dimensional core/shell Ni/NiCoP nano-heterojunction for efficient electrocatalytic water splitting	Yan Li, Yuan Pan, Shoujie Liu, Kaian Sun, Yuansheng Cheng, Ming Liu, Zhaojie Wang, Xiyu Li, Jun Zhang	2019	Ni/NiCoP	Se obtuvo una actividad HER comparable a la del Pt/C comercial especialmente en alcalino, mejor actividad OER que la del IrO ₂
Progressing the development of heteroatom-doped nickel phosphates for electrocatalytic water splitting	Yanhui Yu, Qingrong Chen, Jing Li, Peng Rao, Ruisong Li, Yanlian Du, Chunman Jia, Wei Huang, Junming Luo, Peilin Deng, Yijun Shen,	2022	Ni/Ni ₂ PRu	Los resultados teóricos y experimentales demostraron que el dopaje de heteroátomos es un método eficaz para regular y mejorar la actividad catalítica del Ni ₂ P, principalmente porque puede aumentar la densidad de los sitios

	Xinlong Tian			reactivos y regular la capacidad de adsorción/desorción de los intermediarios de la reacción.
NiCoP-CoP heterostructural nanowires grown on hierarchical Ni foam as a novel electrocatalyst for efficient hydrogen evolution reaction	Xingchen Gao, Kaixin Lu, Jianjun Chen, Jie Min, Deliang Zhu, Manlin Tan	2021	NiCoP-CoP/Ni/NF	Se presentan estructuras en forma de flor formadas por nanohilos heteroestructurales de NiCoP-CoP cultivados directamente sobre una estructura de Ni jerárquicamente porosa (NiCoP-CoP/Ni/NF), el cual se sintetiza mediante electrodeposición catódica galvanostática de capas porosas de Ni sobre espuma de Ni, seguida una simple reacción hidrotérmica y fosforización
Needle-like CoP/rGO growth on nickel foam as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction	Zhaoxia Yang, Rui He, Huimin Wu, Yu Ding, He Mei	2021	CoP/rGO/NF	El CoP/rGO/NF-3 presenta el mejor sobrepotencial, la pendiente de tafel más pequeña y el área electroquímicamente activo más grande y todos sus componentes contribuyen al excelente rendimiento, incluyendo su morfología uniforme, prominente y ordenada
N-doped carbon coated FeNiP nanoparticles based hollow microboxes for overall water splitting in alkaline medium	Yunmei Du, Yi Han, Xudong Huai, Yanru Liu, Caiyun Wu, Yu Yang, Lei Wang	2018	FeNiP/NC	El FeNiP/NC obtenido exhibe una estructura de cubo hueco con seis lados convexos que pueden evitar agregaciones y proporcionar más sitios activos para mejorar el rendimiento catalítico.
N-doped carbon coated NiCo ₂ S ₄ hollow nanotube as bifunctional electrocatalyst for overall water splitting	Fang Li, Rongchen Xu, Yueming Li, Fei Liang, Dafeng Zhang, Wen-Fu Fu, Xiao-Jun Lv	2019	NCT/NiCo ₂ S ₄	La alta estabilidad y actividad en OER y HER implica la aplicación prometedora del NCT/NiCo ₂ S ₄ para la división general del agua, porque se debería aprovechar el electrocatalizador como ánodo y como cátodo simultáneamente para evaluar el rendimiento de la división del agua en un electrolizador alcalino
Systematic design of superaerophobic nanotube array electrode comprised of transition-metal sulfides for overall water splitting	Haoyi Li, Shuangming Chen, Ying Zhang, Qinghua Zhang, Xiaofan Jia, Qi Zhang, Lin Gu, Xiaoming Sun, Li Song & Xun Wang	2018	FeCoNi/HNTA	La excelente superhidrofilicidad da como resultado la formación de una película humectante sobre la superficie del electrodo. Al aumentar la cantidad de electrolito, la película líquida de electrolito puede reducir la región de contacto entre las burbujas y la superficie del electrodo y, por tanto, disminuir la fuerza adhesiva de las burbujas.
CoP-anchored high N-doped carbon@graphene sheet as bifunctional electrocatalyst for efficient overall water splitting	Guilin Li, Lei Li, Zhan Lin	2021	NC-G-CoP/NF	El rendimiento se atribuye al fuerte acoplamiento entre la espuma de Ni y las nanopartículas de CoP a través de NC-G de alta conductividad con abundantes sitios de N. Además, los sitios activos de N abundantes y altamente dispersos en NC-G no solo son útiles para la transferencia de

				electrones de CoP para facilitar la formación de enlaces de H (aumentan la fuerza de unión), sino que también favorecen la inmovilización fuerte de las nanopartículas de CoP durante el proceso electrocatalítico
A highly stable bifunctional catalyst based on 3D Co(OH) ₂ @NCNTs@NF towards overall water-splitting	Pan Guo, Jian Wu, Xi-Bo Li, Juan Luo, Woon-Ming Lau, Hao Liu, Xue-Liang Sun, Li-Min Liu	2018	Co(OH) ₂ /NCNTs/NF	Este diseño único tiene las siguientes ventajas: aumenta las áreas superficiales efectivas accesibles del catalizador, facilita el escape de gases, mejora la transferencia de electrones y evita eficazmente la agregación/aglomeración durante el proceso OER. Hasta donde sabemos, este trabajo es el primer informe sistemático centrado en α -Co(OH) ₂ para investigar su rendimiento catalítico en la separación de agua.
Mass production of Nickel@Carbon nanoparticles attached on single-walled carbon nanotube networks as highly efficient water splitting electrocatalyst	Jianshuo Zhang, Chuxin Wu, Kun Hou, Meihua Huang, Lunhui Guan	2018	NiC/SCN-AN	Desarrollaron un método de descarga por arco de corriente continua que permite la síntesis a gran escala de redes de nanotubos de carbono de pared simple unidas a níquel-carbono como electrocatalizador para la separación de agua de alta eficiencia. Utilizando un dopaje con Nitrógeno ya que se ha demostrado que el dopaje con N es una forma eficaz de regular la estructura electrónica de los materiales, para regular la estructura electrónica y las propiedades electrocatalíticas del grafeno a través de la interacción electrón.
Short-brush NiFeO _x H _y films and the Pt derivative as high-performance electrode materials for efficient electrocatalytic water splitting	Xufang Chen, Dan Li, Yang Li, Weiting Zhang, Chao Huang, Rong Sheng Chen, Wei Wang, Hongwei Ni, Paul K. Chu	2022	Pt/NiFeO _x H _y /NF	Las mediciones electroquímicas se realizaron utilizando una configuración de tres electrodos en el potenciostato a temperatura ambiente. La barra de grafito como contraelectrodo, el electrodo de calomelano saturado (SCE) como electrodo de referencia y los electrocatalizadores sintetizados como electrodos de trabajo, preparado 1 M KOH (pH ~ 13,8) fue el electrolito.
Boosting electrocatalytic hydrogen generation by a renewable porous wood membrane decorated with Fe-doped NiP alloys	Bin Hui, Jian Li, Yun Lu, Kewei Zhang, Hongjiao Chen, Dongjiang Yang, Liping Cai, Zhenhua Huang	2021	Fe _(0.074) NiP/NWM	Se utilizó una membrana "transpirable" autoportante derivada de la madera como electrodo para HER de alta eficiencia mediante un ensamblaje de aleaciones de NiP dopadas con Fe. Las estructuras porosas jerárquicas bien diseñadas en la membrana de madera natural (NWM) son inusualmente beneficiosas para la accesibilidad de los electrolitos y la eliminación del

				gas hidrógeno
Development of a novel method of NiCoP alloy coating for electrocatalytic hydrogen evolution reaction in alkaline media	V.S. Sumi, M. Ameen Sha, S.R. Arunima, S.M.A. Shibli	2019	NiCoP	Se desarrollo y aplico de un nuevo recubrimiento de aleación NiCoP químico, desarrollado por primera vez mediante un método de reducción química, para la reacción de evolución del hidrógeno. La incorporación de cobalto en la masa de NiP aumenta eficazmente el número de sitios activos durante la reacción de evolución del hidrógeno.
Fabrication of Ti ₃ C ₂ @MoO ₃ nanocomposite as an electrode material for highly efficient and durable water splitting system	Iffat Ashraf, Saba Ahmad, Syed Rizwan, Mudassir Iqbal	2021	Ti ₃ C ₂ /MoO ₃	En los nanocompuestos de Ti ₃ C ₂ /MoO ₃ , el Ti ₃ C ₂ actúa como material conductor para facilitar la transferencia rápida de electrones, mientras que el MoO ₃ proporciona estabilidad a largo plazo y evita la formación de nanoescalas y evita que las nanohojas de Ti ₃ C ₂ se vuelvan a apilar.

Nota. En la **Tabla 1**, se condensan las publicaciones seleccionadas para este análisis crítico, considerando el enfoque electroquímico, los materiales propuestos para electrocatalizadores utilizados en celdas fotoelectroquímicas serán discutidos en una sección posterior.

En el artículo de Yaqiang Ji (Ji et al., 2020), se tomaron películas de níquel poroso 3D, jerárquicamente implicó el uso de burbujas de hidrógeno como plantilla dinámica y esto formó poros muy bien interconectados en la película de níquel, luego se sintetizaron las nanoagujas de NiCoP mediante un proceso hidrotérmal y fosfatado sucesivo. Lo que confirió abundantes micro y nano vías para acelerar el transporte de electrones y la penetración del electrolito. Al electrodo de Ni/NiCoP se le realizaron varias evaluaciones de rendimiento en la evolución de hidrógeno en una solución de 1M KOH, por ejemplo, se midió el sobrepotencial del electrodo exhibiendo 61 mV a una densidad de 10 mA/cm², en otra evaluación realizada se midió la estabilidad del electrodo mediante el método de cronopotenciometría, en el cual el electrodo mantuvo su densidad de corriente durante la liberación continua de hidrógeno por más de 200 horas (Ji et al., 2020).

En otro artículo Yan Li (Lin et al., 2019), utilizaron nano-heterojunciones de núcleo/cáscara de Ni/NiCoP multidimensionales es la estrategia SPT (Strain-Induced Phase Transition), en este proceso se forman primero las nanopartículas de níquel y luego se promueve el crecimiento de NiCoP formando cadenas de estructuras de núcleo/cáscara de Ni/NiCoP siendo un electrodo bifuncional, esta estructura mostró un mejoramiento en la estabilidad y actividad para la división del agua de varias maneras, se realizaron varias evaluaciones electroquímicas para determinar su rendimiento en un electrolito de 0.5M H₂SO₄ para medios ácidos y 1M KOH para medios alcalinos, mostrando una eficiencia significativa para la evolución de hidrógeno y evolución de oxígeno, por ejemplo, la tensión de la celda fue de 1.57 V a 10 mA/cm² y solo necesito 1.71 V para alcanzar una densidad de corriente de 50 mA/cm², además demostraron que la actividad podía mantenerse durante al menos 48 horas en la prueba de durabilidad. En el medio ácido el electrodo mostró una menor sobretensión de 125 mV y para el medio alcalino solo necesito 260 mV vs RHE para alcanzar una densidad de corriente de 20 mA/cm² (Lin et al., 2019).

Yanhui Yu (Yu et al., 2022), en su artículo, tomaron un electrodo de Ni/Ni₂PRu, el cual se sintetizó con un dopaje de heteroátomos de Ru, para mejorar el rendimiento de los electrocatalizadores de Ni₂P en la división del agua. Se demostró que las nanohojas de Ni/Ni₂PRu tienen un excelente rendimiento HER en medios ácidos 51 mV a 10 mA/cm² y en alcalinos 1M KOH es de 31 mV a 10 mA/cm², el sobrepotencial de es de 65 mV, cercano al Pt/C comercial que es de 35 mV, pero su coste es mucho menor. Los resultados teóricos y experimentales demostraron que el dopaje de heteroátomos es un método eficaz para regular y mejorar la actividad catalítica del Ni₂P, principalmente porque puede aumentar la densidad de los sitios reactivos y regular la capacidad de adsorción/desorción de los intermediarios de la reacción

(Yu et al., 2022).

Ahora bien, Xingchen Gao (Gao et al., 2021), en su artículo muestra una síntesis de tres pasos para crecer nanocables heteroestructurales de NiCoP-CoP en espuma de Ni jerárquica que consistió en: Electrodeposición de capas porosas de Ni en espuma de Ni, posteriormente una reacción hidrotérmica simple y fosforización. Gracias a la estructura obtenida se aumentó el número de sitios activos para la reacción de evolución de hidrógeno, reduciendo la resistencia a la difusión de gas, las evaluaciones se realizaron en medio alcalino 1M KOH, lo que produjo un sobrepotencial de 49 mV a una densidad de corriente de 10 mA/cm², también mostró una gran estabilidad en la reacción de evolución de hidrógeno con una pequeña variación en el sobrepotencial durante la prueba de estabilidad galvanostática a 50 mA/cm² (Gao et al., 2021).

En otro de los artículos expuestos en la **Tabla 1**, Zhaoxia Yang (Yang et al., 2021), logró sintetizar junto con sus colaboradores un electrocatalizador con compuestos de CoP/rGO/NF, por medio de dos pasos: una síntesis de CoP/NF y una síntesis de CoP/rGO/NF, lo cual permitió la separación de los compuestos con propiedades electrocatalíticas mejoradas para la reacción de evolución de hidrógeno. Las distintas evaluaciones realizadas mostraron un muy buen compartimiento y rendimiento catalítico, dejando ver un sobrepotencial mínimo de 136 mV para generar una densidad de corriente de 50 mA/cm², en medio alcalino 1M KOH, de igual forma, una pendiente de tafel de 135 mV/Dec y una estabilidad buena durante al menos 25 horas (Yang et al., 2021).

Yunmei Du (Du et al., 2018), en su estudio, sintetizaron electrocatalizador de FeNiP/NC utilizando microcajas huecas, al utilizarlas el electrodo adquiere muy buenas propiedades bifuncionales para la división global del agua, ya que radica en su capacidad para catalizar tanto la reacción de evolución de hidrógeno (HER) como la reacción de evolución de oxígeno (OER)

en solución 1M KOH. Se encontró que el electrodo mostró un potencial de 1.50 V a una densidad de corriente de 10 mA/cm² y una estabilidad de 10 horas sin variación alguna, Debido a su excelente rendimiento catalítico para la división global del agua, FeNiP/NC podría utilizarse en la producción de hidrógeno como fuente de energía renovable y sostenible. Además, la estabilidad y la abundancia de los materiales utilizados en la síntesis lo hacen una alternativa atractiva a los catalizadores costosos y menos abundantes, como el platino(Du et al., 2018).

En el artículo de Fang Li (F. Li et al., 2019), los autores sintetizaron un electrodo de NiCo₂S₄, utilizando nanotubos recubiertos de carbono, dopado con nitrógeno convirtiéndose en un electrocatalizador bifuncional para la división del agua, con la estructura obtenida se maximizaron los sitios activos electrolíticos y facilitaron la transferencia de masa, acelerando las tasas de reacción. Se realizaron varias evaluaciones en una solución 1M KOH, presentando sobrepotenciales bajos 295 y 330 mV para impulsar los 100 mA/cm² para HER y OER, la pequeña pendiente de tafel de 86,8 mV/Dec, también reflejó una alta cinética de reacción electrocatalítica, cuando se utiliza específicamente para la división del agua como catalizador solo necesita un voltaje de celda de 1,6 V con una densidad de corriente de 10 mA/cm² para una que se mantenga durante más de 15h sin desactivarse (F. Li et al., 2019).

Haoyi Li y sus colaboradores (H. Li et al., 2018), tomaron un electrodo de FeCoNi/HNTA compuesto por una matriz de nanotubos de sulfuros de metales de transición, presento abundantes sitios activos electroactivos, una excelente conductividad, efectos sinérgicos entre iones metálicos y superaerofobicidad de la superficie del electrodo para una transferencia de masa rápida. En las evaluaciones para determinar el rendimiento del electrodo se utilizó un electrolito de 1M KOH, Se obtuvo una densidad de corriente de 10 mA/cm² a un sobrepotencial de 70 mV, el rendimiento en HER se acerca al catalizador comercial de Pt/C

cargado en espuma de Ni, en el que la diferencia es de solo 11 mV, el valor de la pendiente de tafel es de 37,5 mV/dec, en cuanto a la capacidad de polarización continua y la recuperabilidad estructural se obtuvo densidades de corriente casi constante de 200 mA/cm² durante una cronoamperometría de 80h, presenta una eficiencia faradaica del 99,7% para HER (H. Li et al., 2018).

En otro artículo presente en la **Tabla 1**, Guilin Li, Lei Li y Zhan Lin (G. Li et al., 2021), desarrollaron un electrodo de NC-G-CoP/NF, utilizando una lámina de carbono dopada con nitrógeno (NC-G), que proporciona sitios activos altamente dispersos y abundantes, facilitando la transferencia de electrones gracias a la interfaz entre el CoP y la lámina, de igual forma presento una excelente estabilidad a largo plazo. En cuanto a la evaluación de la actividad catalítica realizada con un electrolito 1M KOH, el electrocatalizador mostró una baja sobretensión de 68 mV a 10 mA/cm² para HER y 255 mV a 50 mA/cm² para OER, también se vio una estabilidad excelente sin cambios significativos en la actividad catalítica durante 35 horas, Los resultados mostraron que el electrocatalizador solo necesitaba 1.435 V para generar una densidad de corriente de 10 mA cm⁻² para la división del agua en general (G. Li et al., 2021).

Pan Guo (Guo et al., 2018), tomo y diseño un nuevo electrocatalizador de Co(OH)₂/NCNTs/NF, por medio de un método de dos pasos, implicando la combinación de deposición química de vapor (CVD) y electrodeposición. Primero, se utiliza CVD para depositar nanotubos de carbono dopados con nitrógeno (NCNTs) en una espuma de níquel. Luego, se realiza el electrodeposición de láminas de α-Co(OH)₂ sobre el sustrato de NCNTs/NF. Este enfoque combinado permite la fabricación del catalizador 3D poroso Co(OH)₂/NCNTs/NF, que exhibe un rendimiento sobresaliente como catalizador bifuncional para la división del agua. Se

realizaron varias evaluaciones en 1M KOH, para determinar el rendimiento electrocatalítico dejando ver una sobretensión de 270 mV para la reacción de evolución de oxígeno (OER) y una sobretensión de 170 mV para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en condiciones de pH neutro, para una densidad de corriente de 10 mA/cm², En cuanto a la estabilidad, el catalizador mantiene su rendimiento durante más de 600 horas de operación continua sin degradación, lo que lo hace altamente prometedor para aplicaciones industriales (Guo et al., 2018).

En otro de los artículos analizados, sus autores (J. Zhang et al., 2018), lograron sintetizar un electrodo de NiC/SCN-AN, utilizando redes de nanotubos de carbono de pared únicas unidas a Ni-C, logrando mejorar la conductividad del material, de igual forma, una protección gracias a esa estructura y también aumentando la actividad electrocatalítica. De acuerdo con las evaluaciones realizadas en 1M KOH, el electrocatalizador mostró un bajo sobrepotencial de 290 mV para OER y 80 mV para HER a una densidad de corriente de 10 mA/cm², lo que indica una alta actividad en la reacción de evolución de hidrógeno, mostrando una estabilidad a más de 10 horas sin variación. Además, tiene una pendiente Tafel más baja 58 mV/Dec, lo que lo hace prometedor para aplicaciones en la producción de energía renovable (J. Zhang et al., 2018).

Xufang Chen y sus colaboradores (Chen et al., 2022), en su estudio tomaron un electrodo de Pt/NiFeO_xH_y/NF, debido que al trabajar con (oxi)hidróxidos se presentó un desafío debido a que su actividad electrocatalítica no es muy satisfactoria, por tal motivo introdujeron una pequeña cantidad de Pt, para mejorar el rendimiento de la película de NiFeO_xH_y/NF, con esto el electrodo exhibió un sobrepotencial de 204 mV a 10 mA/cm² en 1m KOH a un pH (13,8), que supera al de las nanohojas de NiFeO_xH_y convencionales. El electrolizador alcalino compuesto por los dos electrodos requiere sólo 1,54 V para obtener una densidad de corriente de 10

mA/cm^2 , mostrando una pendiente de tafel de 42 mV/Dec (Chen et al., 2022).

En el artículo de Bin Hui (Hui et al., 2021), sintetizaron un electrocatalizador de $\text{Fe}_{(0.074)}\text{NiP/NWM}$, utilizando una membrana de madera porosa renovable para la generación electrocatalítica de hidrógeno, dando así; una buena penetración del electrolito, una buena estabilidad cíclica y excelente sostenibilidad y biodegradabilidad. Sin embargo, la actividad electrocatalítica se ve mejorada por el dopaje con NiP, exhibió una alta actividad electrocatalítica para la generación de hidrógeno. Específicamente, el electrodo mostró una gran densidad de corriente de 100 mA/cm^2 a sobrepotenciales extremadamente bajos de 168 mV en electrolitos ácidos $0.5 \text{ H}_2\text{SO}_4$ y 174 mV en electrolitos alcalinos 1M KOH (Hui et al., 2021).

En otro de los artículos estudiados como en el de V.S. Sumi (Sumi et al., 2019), los autores tomaron un electrocatalizador de NiCoP, donde la incorporación del cobalto en la masa de NiP aumento efectivamente el número de sitios activos durante la reacción de evolución de hidrógeno y la elevada actividad catalítica que presento el electrodo recubierto se consigue gracias al contenido ajustado de $25,06 \text{ wt\%}$ de fósforo y $4,26 \text{ wt\%}$ de cobalto. Con el recubrimiento se consigue un bajo sobrepotencial de 112 mV a una densidad de corriente de 10mA/cm^2 durante la reacción de evolución del hidrógeno en medios alcalinos 1M NaOH . Se consiguió una pendiente tafel de 110 mV/Dec con una alta densidad de corriente de intercambio de $24,67\text{mA/cm}^2$ (Sumi et al., 2019).

Iffat Ashraf, Saba Ahmad, Syed Rizwan y Mudassir Iqbal (Ashraf et al., 2021), en su estudio sintetizaron un electrodo formado por nanocompuestos de $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{MoO}_3$, utilizando un método de síntesis hidrotérmica que crea una interacción íntima entre las láminas de Ti_3C_2 y las nanocintas de MoO_3 , lo que promueve un efecto sinérgico entre los dos materiales. Este electrodo exhibió varias propiedades claves, mejorando la conductividad eléctrica, dando una

muy buena estabilidad a largo plazo y mostrando una excelente eficiencia en la reacción de evolución de hidrógeno (HER) y evolución de oxígeno (OER), se realizaron diferentes evaluaciones para evaluar la actividad electrocatalítica en las cuales mostró bajos sobrepotenciales y alta estabilidad a largo plazo. En particular, el nanocompuesto mostró un sobrepotencial de 91 mV y 190 mV para HER y OER, respectivamente, a una densidad de corriente de 10 mA/cm², en una solución de 1M KOH y mostrando una estabilidad a largo plazo sin variaciones de más de 50 horas. Estos resultados indicaron que el nanocompuesto Ti₃C₂/MoO₃ tiene un gran potencial como material de electrodo para la división del agua y otras aplicaciones en tecnologías de energía sostenible (Ashraf et al., 2021).

Continuando con este análisis crítico, se realiza una comparación entre los estudios vistos anteriormente, ya que se observan diferencias significativas en términos de eficiencia, estabilidad y características electrocatalíticas. El estudio de Yaqiang Ji (Ji et al., 2020), destaca por la síntesis de películas de níquel poroso 3D con nanoagujas de NiCoP, mostrando un sobrepotencial de 61 mV a 10 mA/cm² y una estabilidad de más de 200 horas. En contraste, Yan Li (Lin et al., 2019), presenta nano-heterojunciones de núcleo/cáscara de Ni/NiCoP con un voltaje de celda de 1.57 V a 10 mA/cm² y una excelente estabilidad de 48 horas. Yanhui Yu (Yu et al., 2022), introduce nanohojas de Ni/Ni₂PRu con sobrepotenciales de 51 mV en medios ácidos y 31 mV en alcalinos, cercanos al Pt/C comercial. Xingchen Gao (Gao et al., 2021), logra nanocables heteroestructurales de NiCoP-CoP con un sobrepotencial de 49 mV a 10 mA/cm² y una gran estabilidad en la reacción de evolución de hidrógeno. En comparación, Zhaoxia Yang (Yang et al., 2021), utiliza compuestos de CoP/rGO/NF con un sobrepotencial mínimo de 136 mV a 50 mA/cm² y estabilidad durante 25 horas. Yunmei Du (Du et al., 2018), presenta un electrocatalizador de FeNiP/NC con un potencial de 1.50 V a 10 mA/cm² y estabilidad de 10

horas. Fang Li (F. Li et al., 2019), destaca con un electrodo de NiCo_2S_4 recubierto de carbono dopado con nitrógeno, logrando bajos sobrepotenciales de 295 mV y 330 mV para HER y OER, respectivamente. Haoyi Li (H. Li et al., 2018), introduce un electrodo de FeCoNi/HNTA con un sobrepotencial de 70 mV a 10 mA/cm^2 y una eficiencia faradaica del 99,7% para HER. Guilin Li (G. Li et al., 2021), presenta un electrodo de NC-G-CoP/NF con bajos sobrepotenciales de 68 mV y 255 mV para HER y OER, respectivamente, y estabilidad durante 35 horas.

Por otro lado, Pan Guo (Guo et al., 2018), logra un catalizador 3D poroso $\text{Co(OH)}_2/\text{NCNTs}/\text{NF}$ con sobrepotenciales de 270 mV y 170 mV para OER y HER, respectivamente, y estabilidad durante más de 600 horas. Mientras que, J. Zhang (J. Zhang et al., 2018), destaca un electrocatalizador de NiC/SCN-AN con bajos sobrepotenciales de 290 mV y 80 mV para OER y HER, respectivamente, y estabilidad por más de 10 horas. Xufang Chen (Chen et al., 2022), introduce un electrodo de $\text{Pt/NiFeO}_x\text{H}_y/\text{NF}$ con un sobrepotencial de 204 mV a 10 mA/cm^2 y una pendiente de tafel de 42 mV/Dec. Bin Hui (Hui et al., 2021), destaca un electrocatalizador de $\text{Fe}_{(0.074)}\text{NiP}/\text{NWM}$ con sobrepotenciales de 168 mV y 174 mV para electrolitos ácidos y alcalinos, respectivamente. V.S. Sumi (Sumi et al., 2019), presenta un electrocatalizador de NiCoP con un bajo sobrepotencial de 112 mV a 10 mA/cm^2 en medios alcalinos y finalmente Iffat Ashraf (Ashraf et al., 2021), utiliza nanocompuestos de $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{MoO}_3$ con bajos sobrepotenciales de 91 mV y 190 mV para HER y OER, respectivamente, y estabilidad por más de 50 horas.

En la búsqueda de una opción más viable a nivel industrial, considerando eficiencia, estabilidad, materiales y costo, varias consideraciones deben tenerse en cuenta. Aunque la elección puede depender de factores específicos del contexto industrial, aquí se proporciona una evaluación general de las opciones mencionadas:

Eficiencia y Estabilidad:

Yanhui Yu (Yu et al., 2022): Las nanohojas de Ni/Ni₂PRu mostraron un excelente rendimiento con bajos sobrepotenciales tanto en medios ácidos como alcalinos. Aunque la eficiencia es cercana a la del Pt/C comercial, el costo es menor, lo que podría hacerlo atractivo para aplicaciones industriales.

Pan Guo (Guo et al., 2018): Este catalizador poroso Co(OH)₂/NCNTs/NF exhibió un rendimiento sobresaliente y una estabilidad excepcional durante más de 600 horas. Su eficiencia y durabilidad podrían hacerlo adecuado para aplicaciones industriales a largo plazo.

Guilin Li (G. Li et al., 2021): El electrocatalizador NC-G-CoP/NF mostró bajos sobrepotenciales y una estabilidad excelente durante 35 horas. La baja sobretensión y la estabilidad podrían ser ventajas cruciales para una aplicación industrial continua.

Costo:

Haoyi Li (H. Li et al., 2018): Este electrodo compuesto por nanotubos de sulfuros de metales de transición mostró una eficiencia cercana a los catalizadores de Pt/C con una estabilidad notable. Sin embargo, su viabilidad a nivel industrial dependerá de la disponibilidad y el costo de los materiales utilizados.

Bin Hui (Hui et al., 2021): Utilizaron una membrana de madera porosa renovable para la generación electrocatalítica de hidrógeno, lo que podría ser una opción sostenible y rentable a nivel industrial.

Xufang Chen (Chen et al., 2022): La introducción de una pequeña cantidad de Pt mejora el rendimiento del electrodo de NiFeO_xH_y/NF. Aunque Pt puede ser costoso, la cantidad utilizada es mínima, lo que podría hacerlo viable económicamente.

En términos de una opción más viable a nivel industrial, el catalizador de Yanhui (Yu et

al., 2022), parece ser prometedor debido a su excelente rendimiento y costo relativamente bajo en comparación con el Pt/C comercial. Sin embargo, la elección final dependerá de la disponibilidad de materiales, la facilidad de producción a gran escala y otros factores específicos de la aplicación industrial en cuestión.

Para mejorar las propiedades PEC de los semiconductores de óxido metálico de tipo n, TiO_2 y Fe_2O_3 han atraído una gran atención debido a su bajo coste, gran abundancia y estabilidad en condiciones oxidativas, en este contexto también se presentan varios materiales prometedores como lo es el WO_3 , los antes mencionados y algunos otros los cuales podrían ser unas alternativas muy viables (Singh et al., 2015).

Tabla 2.

Artículos sobre electrodos utilizados en la producción de Hidrógeno por medio de procesos Foelectroquímicos

<i>Nombre</i>	<i>Autores</i>	<i>Año</i>	<i>Electrodo</i>	<i>Observación</i>
Special Z-scheme CdS@WO ₃ hetero-junction modified with CoP for efficient hydrogen evolution	Yupeng Zhang, Xuqiang Hao, Xiaoli Ma, Hai Liu, Zhiliang Jin	2019	CdS/WO ₃ /CoP	Los catalizadores de heterounión de tipo Z compuestos por varios semiconductores tienen la ventaja de acelerar la separación fotogenerada y promover eficazmente la HER, en especial esta heterounión en esquema Z de CdS/WO ₃ modificada por CoP tiene grandes propiedades fotoeléctricas y catalíticas, se sintetizó por medio de síntesis Hidrotermal y se sometió a cocción
TiO ₂ /SnO ₂ nanotubes for hydrogen generation by photoelectrochemical water splitting	M. Radecka, A. Wnuk, A. Trenczeck-Zajac, K. Schneider, K. Zakrzewska	2015	TiO ₂ /SnO ₂	La geometría de las matrices de nanotubos de Ti, crecen verticalmente a partir de un sustrato y tiene grandes áreas superficiales parece ideal para fotólisis del agua, facilita la generación del electrolito y proporciona una transferencia de carga más eficiente
Tailoring surface states in WO ₃ photoanodes for efficient photoelectrochemical water splitting	Trilok Singh, Ralf Muller, Jai Singh, Sanjay Mathur	2015	WO ₃ /AuAg/SnO ₂	La dinámica de los portadores de carga foto inducidos se ve influenciada significativamente por los estados superficiales de las láminas delgadas de WO ₃

Efficient WO ₃ photoanodes fabricated by pulsed laser deposition for photoelectrochemical water splitting with high faradaic efficiency	C. Fábrega, S. Murcia-López, D. Monllor-Satoca, J.D. Prades, M.D. Hernández-Alonso, G. Penelas, J.R. Morante, T. Andreu	2016	γ -WO ₃ /Al ₂ O ₃	Se sintetizó el trióxido de tungsteno orientado y altamente cristalino (WO ₃) crecido por deposición láser pulsada (PLD) sobre sustrato de FTO, para mejorar la eficiencia faradaica de los fotoánodos se consideraron dos estrategias; Deposición de capas atómicas ALD de Al ₂ O ₃
Monoclinic WO ₃ nano multilayers with preferentially exposed (002) facets for photoelectrochemical water splitting	Jijie Zhang, Peng Zhang, Tuo Wang, Jinlong Gong	2015	WO ₃	En este artículo se habla sobre la síntesis de nanocapas de WO ₃ mediante un método solvotérmico con etilenglicol como disolvente, que da lugar a una estructura multicapa única
Interfacial growth of the optimal BiVO ₄ nanoparticles on to self-assembled WO ₃ nanoplates for efficient photoelectrochemical water splitting	Vijay S. kumbhar, Hyeonkwon Lee, Jaewon Lee, kiyoung Lee	2019	WO ₃ /BiVO ₄	La metodología de fabricación aplicada en este artículo para la generación de la heterounión núcleo/cubierta puede proporcionar información sobre sistemas fotoelectroquímicos de oxidación de agua eficientes y de bajo costo para aplicaciones comerciales
Novel microwave-assisted synthesis of porous g-C ₃ N ₄ /SnO ₂ nanocomposite for solar water-splitting	A. Seza, F. Soleimani, N. Naseri, M. Soltaninejad, S.M. Montazeri, S.K. Sandrnezhaad, M.R. Mohanmmadi, H. Asgari Moghadam, M. Forouzandeh, M.H. Amin	2018	g-C ₃ N ₄ /SnO ₂	Se demostró que la creación de grupos OH superficiales en forma de puentes Sn-OH-Sn durante la hidrólisis y condensación del precursor de Sn es responsable de la conversión efectiva de urea en láminas de nitruro de carbono, las cuales se unieron a los agregados de SnO ₂ principalmente a través de enlaces de hidrógeno, esto resultó en la formación de una estructura de heterounión con una mejora potencial en la transferencia de carga
Ti, Zn co-doped hematite photoanode for solar driven photoelectrochemical water oxidation	Quansong Zhu, Chunlin Yu, Xingwang Zhang	2018	Ti/Zn	Se fabricó una película de hematita dopada con Ti sobre vidrio del óxido de Sn (FTO) dopado con flúor primero mediante el método hidrotermal, el dopaje homogéneo con Zn se logró por medio de inmersión-sinterización con Zn(Ac) ₂
3D TiO ₂ /SnO ₂ hierarchically branched nanowires on transparent FTO substrate as photoanode for efficient water splitting	Chuanwei Cheng, Weina Ren, Haifeng Zhang	2014	TiO ₂ /SnO ₂	El fotoelectrodo de nanocables ramificados muestra una menor resistencia a la transferencia de carga en comparación con el del núcleo-carcasa, lo que indica que la estructura de nanocables ramificados facilita la separación y el transporte de carga que surgen del aumento de la superficie de contacto.

Surface-phase junctions of branched TiO ₂ nanorod arrays for efficient photoelectrochemical water splitting	Jiao Liu, Xuelian Yu, Qingya Liu, Rongji Liu, XinKe Shang, Shuangshuang Zhang, Wenhui Li, Wanquan Zheng, Guangjin Zhang, Hongbin Cao, Zhanjun Gu	2014	TiO ₂ /Ru	TiO ₂ ramificado parecido a una flor con matrices de nanobarras (NR) que poseen las uniones superficiales de anatasa (microestructura del TiO ₂) /rutilo en sustratos FTO se sintetizan mediante un método hidrotermal modificado
1D/0D WO ₃ /CdS heterojunction photoanodes modified with dual co-catalysts for efficient photoelectrochemical water splitting	Yanting Li, Zhifeng Liu, Jing Zhang, Zhengang Guo, Ying Xin, Lei Zhao	2019	WO ₃ /CdS/ NiOOH/Co-P	Se introdujo NiOOH y Co-P amorfos para modificar el fotoánodo 1D/0DWO ₃ /CdS. En este fotoánodo cuaternario WO ₃ /CdS/NiOOH/Co-P, el efecto del CdS como absorbedor de luz y el efecto sinérgico del NiOOH en la en la superficie interior como capa de almacenamiento de huecos y del Co-P en la superficie exterior como capa de transferencia de huecos, mejoraron el rendimiento PEC.
Enhancing photoelectrochemical water oxidation efficiency via self-catalyzed oxygen evolution: A case study on TiO ₂	Xiaowei Lv, Leiming Tao, Minglei Gao, Xin Xiao, Mingkui Wang, Yan Shen	2018	TiO ₂ /N ₂	Se demostró una estrategia conceptual de evolución de oxígeno auto catalizada en un sistema PEC para conseguir una inyección de carga eficiente y estable mediante la introducción de vacantes de oxígeno (Ovac) en el TiO ₂ dopado con nitrógeno (N-TiO ₂), que desempeña el doble papel de absorbente de luz y catalizador electroquímico.

Nota. En la **Tabla 2**, se muestran las publicaciones seleccionadas para este análisis crítico: Estado del Arte.

Para esta discusión basada en la **Tabla 2**, se analizaron cada uno de los artículos expuestos y al finalizar se dará un criterio ingenieril sobre cuáles de ellos obtuvo los mejores rendimientos, teniendo en cuenta todos los factores posibles.

Yupeng Zhang (Y. Zhang et al., 2019), en su artículo tomó un nuevo tipo de fotoánodo de CdS/WO₃/CoP, el cual se logró por una primera síntesis de CdS/WO₃ mediante una precipitación y seguido de una deposición química, para llevar a cabo la formación de la heterounión Z y por último fue modificado con CoP, demostrando así con las evaluaciones realizadas su excelente rendimiento para la producción de hidrógeno, exhibiendo una producción de H₂ de 736.89 mmol

evaluada en una solución de 0.2M Na₂SO₂, en cuanto a la evaluación de rendimiento cuántico se encontró que fue de 1.72% lo que demuestra la alta eficiencia del proceso bajo luz visible, para la evaluación de micromorfología se vio que el catalizador tenía una alta cristalinidad y una morfología de nanorod y en el ensayo de transferencia de carga foto-generada presento una mejora significativa, lo que respalda su potencial como una solución prometedora para la producción sostenible de hidrógeno (Y. Zhang et al., 2019).

En el artículo de M. Radecka (Radecka et al., 2015), tomó un catalizador de TiO₂/SnO₂, fabricado en forma de nanotubos que se cultivaron mediante anodización electroquímica de películas delgas de Ti/Sn depositadas sobre una lámina de titanio, en el estudio se realizaron varias evaluaciones en las cuales la eficiencia solar-hidrogeno mejoró con la con la incorporación de Sn de aproximadamente un 2% lo que puede atribuirse a una mayor densidad de foto corriente que alcanzo 0,2 mA/cm², un tiempo de recombinación más largo 5-15 seg, y un potencial de banda plana más negativo V_{fb}=-0,5;-0,6 V, evaluadas en soluciones a base de etilenglicol (EG) y una mezcla de glicerol y etilenglicol (GL/EG). Los resultados de las pruebas en estas soluciones mostraron diferencias significativas en la eficacia de la generación de hidrógeno, lo que resalta la influencia del electrolito en las propiedades fotoelectroquímicas de los nanotubos de TiO₂/SnO₂ (Radecka et al., 2015).

Trilok Singh y sus colaboradores (Singh et al., 2015), utilizaron dos métodos para adaptar las propiedades superficiales de las películas delgadas de WO₃, primero realizaron un tratamiento con plasma de hidrógeno y se hizo un recubrimiento con conglomerados de metales nobles y sintetizar el catalizador WO₃/AuAg/SnO₂, mejorando significativamente los procesos de captación de luz y separación/transporte de carga en los fotoánodos de WO₃. En las evaluaciones se utilizó un electrolito de 1 M (CH₃HSO₃) y se llevaron a cabo mediciones de

voltamperometría cíclica y voltamperometría lineal, tanto en condiciones de oscuridad como bajo iluminación solar simulada con una lámpara de xenón. Los resultados mostraron que las películas de WO_3 tratadas con plasma de hidrógeno y las películas de WO_3 recubiertas con nanopartículas de metales nobles tuvieron una mayor densidad de corriente fotocatalítica que las películas de WO_3 sin tratar. En particular, la densidad de corriente fotocatalítica de las películas de WO_3 tratadas con plasma de hidrógeno fue 7 veces mayor que la de las películas de WO_3 sin tratar, mientras que la densidad de corriente fotocatalítica de las películas de WO_3 recubiertas con nanopartículas de metales nobles fue 5 veces mayor que la de las películas de WO_3 sin tratar. Estas películas mostraron una mayor absorción de luz visible y en consecuencia una mayor densidad de fotocorriente (1,4 mA/cm^2 a 1,0 V para electrodo recubierto con Ag y 0,8 mA/cm^2 recubierto con Au) (Singh et al., 2015).

En uno de los artículos mostrados en la **Tabla 2**, C. Fàbrega (Fàbrega et al., 2016), tomó un fotoánodo de $\gamma\text{-WO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, el cual fue sintetizado mediante unas películas de WO_3 monoclinico en sustratos de FTO mediante deposición laser pulsada, la morfología de las películas permitió la penetración del electrolito dentro de las columnas de WO_3 , contribuyendo a mejorar el transporte de carga. Entre las evaluaciones realizadas están: una caracterización estructural, una caracterización óptica, en la cual se encontró que el coeficiente de absorción de WO_3 es bajo en comparación con otros materiales, lo que implica que se necesitan películas más gruesas para lograr una absorción completa del espectro solar, también se llevaron a cabo mediciones de corriente fotocatalítica en una solución 0.1M H_2SO_4 , bajo irradiación AM 1.5G, alcanzando hasta 2.4 mA/cm^2 (60% del máximo óptico) y 3.1 mA/cm^2 (78% del máximo óptico) en una configuración de doble pila y mediciones de eficiencia faradaica, logrando eficiencias superiores al 50% sin co-catalizador y del 80% con la adición de una capa de Al_2O_3

de 3 nm por deposición atómica de capas (ALD) (Fàbrega et al., 2016).

Jijie Zhang (J. Zhang et al., 2015), en su artículo tomaron nanomulticapas de WO_3 con caras perfectamente expuestas para la división fotoelectroquímica del agua, estas caras expuestas proporcionan sitios reactivos que facilitan la absorción de luz y la separación eficiente de cargas, lo que conduce a una mayor eficiencia en la generación de hidrógeno a partir del agua. La exposición preferencial de estas caras activas mejora la actividad fotoelectroquímica del WO_3 , lo que lo hace más efectivo como fotoánodo. En el estudio se llevaron a cabo varias evaluaciones, incluyendo una estructural, una fotoelectroquímica en la que se exhibió una densidad de fotocorriente de 1.62 mA/cm^2 a 1.25 V (vs Ag/AgCl) bajo $1,5 \text{ G AM}$ y un IPCE del 40% a 400 nm con una polarización $0,67 \text{ V}$ (frente al Ag/AgCl) debido a su exclusiva nanoestructura y una irradiación de luz de 100 mW/cm^2 en solución $0.1 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ y de la misma forma se evaluó la producción de hidrógeno, mostrando una tasa de producción de H_2 utilizando los fotoánodos de nanomulticapas de WO_3 fue de $3 \text{ } \mu\text{mol/h} \cdot \text{cm}^2$, en $0,5 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ (pH 0,3) a $1,0 \text{ V}$ frente a un contraelectrodo de Pt (J. Zhang et al., 2015).

En el artículo de Vijay S. Kumbhar (Kumbhar et al., 2019), se evaluó un fotoánodo de heterouniones de núcleo-cáscara de $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$, En el estudio se utilizaron tres diferentes nanoestructuras de WO_3 : nanoplatos, nanobricks y láminas apiladas, se observó que los nanoplatos de WO_3 mostraron una densidad de corriente fotocatalítica considerablemente elevada en comparación con las otras nanoestructuras. Esto sugiere que la morfología de las nanoestructuras de WO_3 tiene un impacto significativo en el rendimiento general de la heterounión de núcleo-cáscara. La mayor eficiencia fotocatalítica de los nanoplatos de WO_3 puede estar relacionada con su mayor área superficial y su capacidad para facilitar la transferencia de carga eficiente en la heterounión con BiVO_4 , mostrando una densidad de

corriente fotoelectroquímica mejorada de 1.7 mA/cm² a 1.23 V vs. el electrodo de hidrógeno reversible bajo iluminación AM 1.5 G, en una solución de 0.5M Na₂SO₄ y obteniendo una mayor capacidad de captación de luz del BiVO₄ en la capa exterior, mostrando una estabilidad del 98% después de 2 h de radiación continua, con capacidad de producción de 382 μL/cm² (Kumbhar et al., 2019).

A. Seza (Seza et al., 2018), en su estudio utilizaron un catalizador de g-C₃N₄/SnO₂, el cual fue sintetizado mediante el método de síntesis asistido por microondas, con las cuales se formaron los nanocompuestos, se realizaron diversas evaluaciones de los nanocompuestos, incluyendo pruebas de degradación fotocatalítica de un colorante modelo bajo luz visible, así como análisis de fotovoltaje, fotoluminiscencia y espectroscopía de impedancia electroquímica para evaluar la eficiencia fotoactiva y la separación de cargas, en solución de 0.2M Na₂SO₄ en un reactor vítreo equipado con una ventana de cuarzo para iluminar la muestra. Se obtuvo una densidad de fotocorriente de 33 μm/cm² a un potencial de 0,5 V al probar este nanocompuesto como fotoánodo en reacciones de división del agua bajo radiación de luz visible simulada de un microondas, demostrando que la creación de grupos OH superficiales en forma de puentes Sn-OH-Sn durante la hidrólisis y condensación del precursor de Sn es responsable de la conversión efectiva de urea en láminas de nitruro de carbono, las cuales se unieron a los agregados de SnO₂ principalmente a través de enlaces de hidrógeno, esto resultó en la formación de una estructura de heterounión con una mejora potencial en la transferencia de carga (Seza et al., 2018).

Continuando con la discusión, en el artículo de Quansong Zhu (Zhu et al., 2019), él y sus colaboradores tomaron un fotoánodo de Ti/Zn, sintetizado por mediante dos pasos, un método hidrotérmico y un tratamiento de inmersión-sinterización, las evaluaciones realizadas fueron: 1. Microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la morfología de la hematita dopada con

Ti y Zn. 2. Espectroscopía UV-Vis para estudiar las propiedades ópticas del material. 3. Análisis de impedancia electroquímica (EIS) para investigar la resistencia de la superficie y la transferencia de carga. 4. Medición de corriente-voltaje lineal para evaluar la actividad de oxidación del agua. 5. Cálculos de teoría funcional de la densidad (DFT) para comprender los aspectos teóricos del dopaje. Los resultados evidenciaron una mejora con una densidad de corriente de 0,80 a 1,02 mA/cm² a una polarización de 1,23 V frente a RHE, además la prueba de estabilidad mostró que no se observó reducción de la densidad de fotocorriente después de 7 h de iluminación (Zhu et al., 2019).

Chuanwei Cheng (Cheng et al., 2014), tomó un fotoánodo de TiO₂/SnO₂, utilizando nanocables ramificados jerárquicamente en 3D que implica la combinación de dos métodos de crecimiento: el crecimiento por vapor de nanocables de SnO₂ y el crecimiento epitaxial en solución de nanovarillas de TiO₂. Con esto se logró aumentar el área superficial y la capacidad de dispersión de la luz y también ayudó a proporcionar caminos de transporte de electrones directos y rápidos. Con las evaluaciones realizadas se mostró que el fotoánodo exhibió una densidad de corriente fotovoltaica de aproximadamente 1.0 mA/cm² a 1.0 V vs Ag/AgCl en una solución 1M NaOH con pH 12.5, lo que representa un rendimiento mejorado en comparación con otros diseños de fotoánodos. La estructura ramificada jerárquica en 3D demostró una mayor capacidad de dispersión de la luz, una mejora en la transferencia de carga y una mayor eficiencia en la recolección de carga (Cheng et al., 2014).

En el estudio realizado por Jiao Liu y sus colaboradores (Liu et al., 2014), se tomó un fotoánodo de TiO₂/Ru, por medio de una unión superficial, utilizando matrices de nanovarillas de TiO₂ y el rutilo, la presencia de este en las matrices de nanovarillas permitió la formación de uniones de fase superficial entre la fase anatasa y la fase rutilo, lo que mejoró la eficiencia de

separación de carga y la densidad de corriente fotocatalítica en la división del agua fotoelectroquímica, también contribuyó a mejorar la estabilidad de las matrices de nanovarillas ramificadas, lo que es importante para su uso en aplicaciones prácticas. Se llevaron a cabo varias evaluaciones, en las que se incluyeron: caracterización estructural, evaluación de las propiedades ópticas y medición de las propiedades fotoelectroquímicas en solución de 1M KOH, los resultados obtenidos demostraron que la medición PEC muestra que la respuesta fotoeléctrica aumentó significativamente con la unión de fase superficial y una densidad de fotocorriente más alta de $1,02 \text{ mA/cm}^2$ se observa a $0,8 \text{ V}$ frente a RHE cuando el fotoelectrodo se ilumina mediante un simulador solar (AM 1,5G), con una lámpara Xe de 150W (Liu et al., 2014).

Yanting Li (Y. Li et al., 2019), en su artículo tomo un catalizador de $\text{WO}_3/\text{CdS}/\text{NiOOH}/\text{Co-P}$, el cual fue sintetizado por un método de electrodeposición asistido por luz, este proceso incluyó la deposición de capas de CdS sobre sustratos de WO_3 , seguido por la deposición fotoasistida de NiOOH y Co-P. Además, se utilizaron técnicas de electrodeposición y fotodeposición para la incorporación de los co-catalizadores duales en el fotoánodo. El uso de la luz durante el proceso de deposición es una característica clave de la síntesis, ya que permite la formación controlada de las capas de co-catalizadores sobre la estructura de heterounión WO_3/CdS . Las evaluaciones realizadas en $0.2\text{M Na}_2\text{SO}_4$, mostraron un desplazamiento catódico de 300mV del potencial de inicio con la modificación de NiOOH/Co-P. Además, la estructura compuesta presenta una corriente foto mejorada de $2,59 \text{ mA/cm}^2$ a $1,0\text{V}$ frente a RHE, que es 6,4 veces superior a la del WO_3 desnudo (Y. Li et al., 2019).

Por último, Xiaowei Lv (Lv et al., 2018), en su estudio sintetizó un fotoánodo por medio de un proceso de síntesis de películas de $\text{TiO}_2\text{-N}_2$ que implicó la preparación de una fina capa de TiO_2 en láminas de titanio mediante anodización potencioestática, seguida de un proceso de

calcinación en atmósfera de nitrógeno a 800 °C durante 2 horas. Este método suave de dopaje con nitrógeno permitió la incorporación de nitrógeno en el TiO₂. Se realizaron evaluaciones de la eficiencia de inyección de carga de los electrodos TiO₂-N₂ mediante curvas de barrido lineal (LSV) en solución de KOH 0.1 M con y sin un agente secuestrador de huecos (Na₂SO₃), los resultados mostraron que la eficiencia de inyección de carga de TiO₂-N₂ es de aproximadamente el 100% y que la eficiencia (η) alcanza el 80% a un sesgo anódico bajo de 0.4 V RHE y hasta el 94.6% a 1.23 V RHE. Estos valores son comparables a los de la fotoelectrocatalisis reportada modificada con OEC, lo que sugiere que los vacíos de oxígeno en las películas de TiO₂-N₂ juegan un papel importante en aumentar la reactividad de los sitios activos y reducir el sobrepotencial anódico para la evolución de oxígeno, lo que mejora la eficiencia de la inyección de carga y la eficiencia de la división del agua fotoelectroquímica (Lv et al., 2018).

En la comparación de los diferentes fotoánodos presentados, se observan variaciones significativas en términos de eficiencia, estabilidad y sobrepotencial, lo que destaca la diversidad de enfoques y estrategias utilizadas para mejorar la eficiencia de la generación de hidrógeno a través de la división fotoelectroquímica del agua. El catalizador CdS/WO₃/CoP presentado por Yupeng Zhang (Y. Zhang et al., 2019), muestra una alta eficiencia de producción de hidrógeno (736.89 mmol) y un rendimiento cuántico del 1.72%, lo que indica un excelente desempeño bajo luz visible. Por otro lado, el estudio de M. Radecka (Radecka et al., 2015), destaca la influencia del electrolito en las propiedades fotoelectroquímicas del fotoánodo de TiO₂/SnO₂, mejorando la eficiencia solar-hidrógeno con la incorporación de Sn. Trilok Singh (Singh et al., 2015), lograron mejoras significativas en la densidad de corriente fotocatalítica al tratar las películas de WO₃ con plasma de hidrógeno y recubrirlas con nanopartículas de metales nobles. Además, el estudio de C. Fàbrega (Fàbrega et al., 2016), muestra una eficiencia faradaica superior al 80% con la

adición de una capa de Al_2O_3 al fotoánodo de $\gamma\text{-WO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$.

En cuanto a la morfología y estructura, Jijie Zhang (J. Zhang et al., 2015), resalta la importancia de las nanomulticapas de WO_3 con caras expuestas para una mayor eficiencia en la generación de hidrógeno. Vijay S. Kumbhar (Kumbhar et al., 2019), demuestran que la morfología de las nanoestructuras de WO_3 , especialmente los nanoplatos, tiene un impacto significativo en la eficiencia de la heterounión de núcleo-cáscara con BiVO_4 . Por otro lado, A. Seza (Seza et al., 2018), incorporaron SnO_2 en nanocompuestos $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SnO}_2$, mostrando una densidad de fotocorriente de $33 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ y destacando la formación de grupos OH superficiales en la síntesis.

En términos de estabilidad, el estudio de Quansong Zhu (Zhu et al., 2019), señala que el fotoánodo de Ti/Zn mantuvo su densidad de fotocorriente sin reducción después de 7 horas de iluminación, indicando una buena estabilidad. Sin embargo, la estabilidad del sistema también se ve influenciada por la presencia de dopantes, como en el caso de Yanting Li (Y. Li et al., 2019), quienes lograron una mejora significativa en la densidad de corriente con un catalizador de $\text{WO}_3/\text{CdS}/\text{NiOOH}/\text{Co-P}$.

En resumen, la variabilidad en las estrategias de diseño y síntesis de los diferentes materiales resalta la importancia de considerar factores como la morfología, la presencia de co-catalizadores y la estructura cristalina al seleccionar un fotoánodo para aplicaciones específicas en la generación sostenible de hidrógeno.

En este contexto, al considerar la escalabilidad a nivel industrial, varios factores deben ser tomados en cuenta, incluyendo eficiencia, estabilidad y costo, algunas consideraciones pueden ayudar a identificar la opción más viable:

Eficiencia: La eficiencia de conversión de energía solar en hidrógeno es crucial para la

viabilidad industrial. Fotoánodos con alta eficiencia, como el catalizador CdS/WO₃/CoP presentado por Yupeng Zhang (Y. Zhang et al., 2019), podrían ser prometedores. Sin embargo, también es importante tener en cuenta la estabilidad a largo plazo de la eficiencia y la toxicidad del Cd.

Estabilidad: La estabilidad del material bajo condiciones industriales continuas es esencial. Fotoánodos que demuestren un rendimiento sostenido durante largos periodos, como el Ti/Zn de Quansong Zhu (Zhu et al., 2019), podrían ser preferidos.

Costo: La viabilidad económica es un factor crítico. Métodos de síntesis y materiales que sean económicamente viables a gran escala son esenciales. Técnicas como la deposición química y el uso de materiales abundantes podrían reducir los costos.

Facilidad de fabricación: La facilidad con la que se puede producir y escalar la fabricación del material es crucial. Técnicas de síntesis simples y reproducibles, como la electrodeposición utilizada por Yanting Li (Y. Li et al., 2019), podrían ser beneficiosas.

Disponibilidad de materias primas: La disponibilidad y sostenibilidad de las materias primas también son aspectos importantes. Materiales que utilizan componentes abundantes y accesibles podrían tener ventajas en términos de disponibilidad y costo.

Como ingeniero metalúrgico, me enfocaría en opciones que no solo sean eficientes y estables, sino también que cuenten con procesos de fabricación escalables y materiales económicamente viables. Basándome en la información proporcionada, consideraría la opción de Ti/Zn presentado por Quansong Zhu (Zhu et al., 2019). Ya que cuenta con una eficiencia razonable, el fotoánodo Ti/Zn ha demostrado una densidad de corriente fotocatalítica considerablemente elevada (1.02 mA/cm²) a una polarización de 1.23 V vs RHE, indicando un rendimiento razonable para su consideración. También presenta una estabilidad demostrada, la

cual no mostró reducción en la densidad de fotocorriente después de 7 horas de iluminación, es una señal positiva de su resistencia a largo plazo. Un proceso de fabricación relativamente sencillo sobre la síntesis de Ti/Zn, ya que no mencionan métodos extremadamente complejos, lo que sugiere una potencial facilidad de fabricación a mayor escala. Los materiales son asequibles, la elección de titanio (Ti) y zinc (Zn) como componentes principales puede ser ventajosa desde el punto de vista de costos, ya que ambos materiales son relativamente abundantes y económicamente accesibles y un mantenimiento de la estabilidad bajo condiciones extremas, la estabilidad del Ti/Zn frente a condiciones prolongadas de iluminación sugiere una resistencia a descomposiciones o degradaciones que son críticas para operaciones industriales sostenibles.

Tabla 3.

Propiedades de los materiales evaluados en los diferentes estudios

Material	Propiedades Físicas	Propiedades Químicas	Abundancia Aproximada (%)	Costo Aproximado (\$)
Níquel	Densidad: 8.91 g/cm ³ , Punto de fusión: 1455 °C Tiene buena conductividad tanto eléctrica como térmica	Metálico, resistente a la corrosión y muy buen catalizador	0.019	0.015695 USD/Kg
Cobalto	Densidad: 8.9 g/cm ³ , Punto de fusión: 1495°C Es ferromagnético, estable al aire y no reacciona con el agua, presenta buena conductividad eléctrica y térmica	Magnético, ayuda a mejorar el rendimiento lo que reduce la energía necesaria para dividir el agua	0.001	28.73 USD/Kg
Fosforo	Alcanza su punto de fusión a los 44,15° C. Su densidad es 1823 kg/m ³ , no metálico	Reactivo no metálico, no se utiliza de manera directa, pero puede ser parte de los materiales del catalizador	0.099	40 USD/Kg
Hierro	Densidad de 7874 kg/m ³ , Punto de fusión 1535°C. Es un metal extremadamente duro y denso, maleable y presenta propiedades magnéticas	Magnético y forma compuestos con el oxígeno	5	0.12 USD/Kg
Óxido de Tungsteno	Punto de fusión: 1473°C, Apariencia amarilla a polvo o trozos de color	Compuesto por oxígeno y tungsteno, el cual se sintetiza por la	0.0064	0.33 USD/Kg

	verde o azul o violeta, sin olor	exposición de un filamento a aire a altas T° (2000-3000°C)		
Cadmio	Densidad: 8.69 g/cm ³ , Punto de fusión: 321°C, es un metal pesado, blando, tiene maleabilidad, no presenta olor característico	Su toxicidad es alta, frente a ácidos su reactividad es alta, a altas T° es inflamable	0.0001	60 USD/Kg
Azufre	Sólido de color amarillo, Punto de fusión: 119°C	Reactivo no metálico	0.03-0.1	0.1 USD/Kg
Óxido de Grafeno	Puede presentar propiedades aisladoras, semiconductoras o metálicas, es hidrofílico, se disuelve fácilmente en polímeros	Compuesto de carbono y oxígeno Se utiliza como electrodo y catalizadores en celdas	Sintético	15.75 USD/Kg
Grafeno	Monocapa de átomos de carbono, casi transparente, es duro, flexible, delgado y conductor de calor y la electricidad	Alótropo del carbón, esta formado por anillos hexagonales	Sintético	167 USD/Kg
Nitrógeno	Gas diatómico, su punto de fusión es de -210°C y de ebullición -195.79°C, su densidad es de 1.25 g/L	Inerte, en su forma molecular N ₂ es el gas más abundante de la tierra	78.1 aire atmosférico en volumen 0.002 en masa	0.5 USD/Kg
Platino	Densidad: 21.45 g/cm ³ , Punto de fusión: 1768°C, metal pesado, alta resistencia eléctrica, maleable y dúctil	Catalizador, resistente a la corrosión y condiciones climáticas extremas, es inerte a ácidos y reactivos comunes	Se estiman 70.000 Tn y el 95% en Sudáfrica	30.739,55 USD/Kg
Titanio	Densidad: 4.5 g/cm ³ , Punto de fusión: 2623°C, tiene una alta resistencia eléctrica, es resistente a la mayoría de ácidos orgánicos y soluciones de cloruros	Metal ligero, resistente a la corrosión, se utiliza como catalizador para proporcionar el rendimiento y la durabilidad necesarios	0.63	65 USD/Kg
Molibdeno	Densidad: 10.28 g/cm ³ , Punto de fusión: 2623°C, presenta propiedades magnéticas, bajo presiones normales y T° ambiente se encuentra en estado sólido	Metal de transición resistente al calor, es altamente resistente al ácido clorhídrico, se oxida a T° mayores a los 600°C	0.0002	24 USD/Kg
Carbón	Elemento no metálico y alotrópico, puede ser sólido y resistente en forma de diamante y blando y débil como el grafito	Reacciona con el hidrogeno, formando hidrocarburos, tiene una característica química muy única, pues la suma de todos sus compuestos es mucho mayor que la suma total de todos los otros compuestos de los demás elementos	50	0.5 USD/Kg

		combinados		
Oxido de estaño	Punto de fusión: 1129°C, es un sólido cristalino, Densidad: 6.45 g/cm ³ , es insoluble en agua fría o caliente	Se forma mediante la oxidación del estaño por el oxígeno, es soluble en ácidos comunes y en bases fuertes	Menos común	16.18 USD/Kg
Oro	Metal suave, maleable y de color amarillo, Densidad: 19.32 g/cm ³ , Punto de fusión: 1064°C	Metal precioso, no se corroe, es inerte, tiene una excelente conductividad eléctrica	0.0000004	64.428,86 USD/Kg
Plata	Densidad: 10.49 g/cm ³ , Punto de fusión: 961°C, es un metal suave, maleable y de color brillante, posee la mayor conductividad tanto térmica como eléctrica	Es inerte, es notable por su rareza, densidad y su excelente conductividad eléctrica	0.00007	738.25 USD/Kg
Alúmina	Sólido cristalino, densidad de 3.95 g/cm ³ , punto de fusión 2072°C	Es duro y resistente al desgaste, excelentes propiedades dieléctricas, resistente al acate de ácidos, buena conductividad térmica, alta resistencia y rigidez	15.8	2.43 USD/Kg
Zinc	Metal de color blanco azulado, es frágil al tacto, Punto de fusión: 420°C, Densidad: 7.14 g/cm ³ , buena conductividad térmica y eléctrica	Potente agente de reducción, no reacciona con el oxígeno, el divalente, reacciona fácilmente con bases, ácidos y otros compuestos no metálicos	0.0076	2.94 USD/Kg
Rutilo	Sólido cristalino, Densidad de 4.23 g/cm ³ , Punto de fusión 1843°C	Tiene un contenido de Titanio casi del 60%, presenta gran resistencia al ataque químico, se disuelve en hidróxidos de metales alcalinos	Menos común	2.75 USD/kg

Nota. En la **Tabla 3**, se muestran los diferentes materiales empleados en cada uno de los estudios analizados y evaluados en las dos tablas anteriores, en esta tabla se dan a conocer sus propiedades físicas y químicas, el costo y la abundancia de dichos materiales por separado.

Considerando los datos presentados anteriormente, lo leído en los artículos y centrándonos en la producción de hidrógeno verde mediante métodos electroquímicos y fotoelectroquímicos, se seleccionaron cinco materiales como candidatos destacados:

1. Platino (Pt): Este material a diferencia de los demás es un catalizador altamente

- eficiente en la reacción de evolución de hidrógeno (HER), posee una alta estabilidad y durabilidad en el tiempo. Pero, aunque es altamente efectivo, el alto costo del platino es una limitación en términos de escalabilidad y costos de producción.
2. Titanio (Ti): Este elemento y sus compuestos como por ejemplo el TiO_2 , presentan muy buenas propiedades semiconductoras útiles para aplicaciones fotoelectroquímicas, también exhiben buena estabilidad química y abundancia en el mundo, su costo es mucho menor que el del Pt. Sin embargo, la eficiencia de conversión y la optimización de la respuesta fotoelectroquímica requieren de más estudios.
 3. Molibdeno (Mo): Este elemento y sus compuestos como el MoO_3 , muestran ser un catalizador eficiente en la reacción de evolución de oxígeno (OER), demostrando una buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. Como consideración se debería tener en cuenta la abundancia y disponibilidad de este material, así como las preocupaciones ambientales también deben ser consideradas a gran escala.
 4. Óxido de Grafeno (GO): En este elemento las propiedades son ajustadas para aplicaciones específicas, presenta alta conductividad eléctrica y es muy utilizado en celdas fotoelectroquímicas, considerando que su producción a grande escala puede ser costosa, y se necesitan estudios para métodos de fabricación más eficientes.
 5. Cobalto (Co): Es un material muy utilizado ya que se comporta como un catalizador eficiente en la reacción de evolución de hidrógeno, el costo relativamente bajo ayuda a su escalabilidad y posee una buena conductividad eléctrica, se puede considerar su disponibilidad.
 6. Níquel (Ni): El níquel se ha estudiado como un catalizador para la reacción de

evolución de hidrógeno (HER), que es una parte fundamental del proceso electroquímico, aunque no es tan eficiente como el platino, el níquel es más abundante y menos costoso, lo que lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista económico. También se puede utilizar como material para electrodos en celdas electroquímicas.

Estos materiales han sido seleccionados considerando su eficacia en procesos electroquímicos, su estabilidad química, conductividad eléctrica y la posibilidad de ser utilizados en sistemas fotoelectroquímicos. Sin embargo, es crucial destacar que la elección del material dependerá de los requisitos específicos de la aplicación, considerando aspectos económicos, medioambientales y de disponibilidad de recursos. La investigación continua y la mejora de los métodos de fabricación también son esenciales para avanzar en la eficiencia y sostenibilidad de estos procesos.

5. Conclusiones

Luego del análisis crítico de los diferentes estudios presentados en la **Tabla 1** y teniendo en cuenta las propiedades expuestas en la **Tabla 3**, todos los catalizadores presentados son buenos candidatos, sin embargo, la elección del electrocatalizador depende de las prioridades específicas de aplicación. En este caso la elección será basada en un equilibrio entre la eficiencia, durabilidad y el costo, con lo cual el electrodo que puede llegar a ser una opción sólida para la producción de hidrógeno por medio de electrólisis del agua utilizando métodos electroquímicos, es el de Ni/Ni₂Ru (Yu et al., 2022).

El análisis crítico de los estudios presentados en la **Tabla 2**, relacionados con el proceso fotoelectroquímico y con la ayuda de la **Tabla 3**, se considera que este tipo de fotoelectrodos aún requiere de mayores investigaciones y estudios, sin embargo, una opción interesante para un catalizador, él cual muestra un equilibrio entre abundancia de los materiales, un costo relativamente bajo, una eficiencia buena y durabilidad, es el de Ti/Zn (Zhu et al., 2019). Ante esto se recomienda seguir con la investigación ya que tiene un gran potencial para la producción de hidrógeno.

6. Recomendación

Con base en la elección de los dos catalizadores que poseen un mejor equilibrio y teniendo en cuenta que la investigación de los sistemas fotoelectroquímicos aún requiere mayores estudios, se recomienda que se tome el electrodo de Ni/Ni₂Ru (Yu et al., 2022), como el mejor candidato para ser el ganador de este análisis crítico.

Referencias bibliográficas

- Ashraf, I., Ahmad, S., Rizwan, S., & Iqbal, M. (2021). Fabrication of Ti₃C₂@MoO₃ nanocomposite as an electrode material for highly efficient and durable water splitting system. *Fuel*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120928>
- Chen, X., Li, D., Li, Y., Zhan, W., Huang, C., Chen, R., Wang, W., Ni, H., & Chu, P. K. (2022). Short-brush NiFeO_xHy films and the Pt derivative as high-performance electrode materials for efficient electrocatalytic water splitting. *Applied Surface Science*, 574. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151636>
- Cheng, C., Ren, W., & Zhang, H. (2014). 3D TiO₂/SnO₂ hierarchically branched nanowires on transparent FTO substrate as photoanode for efficient water splitting. *Nano Energy*, 5, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.03.002>
- Du, Y., Han, Y., Huai, X., Liu, Y., Wu, C., Yang, Y., & Wang, L. (2018). N-doped carbon coated FeNiP nanoparticles based hollow microboxes for overall water splitting in alkaline medium. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(49), 22226–22234. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.091>
- Fàbrega, C., Murcia-López, S., Monllor-Satoca, D., Prades, J. D., Hernández-Alonso, M. D., Penelas, G., Morante, J. R., & Andreu, T. (2016). Efficient WO₃ photoanodes fabricated by pulsed laser deposition for photoelectrochemical water splitting with high faradaic efficiency. *Applied Catalysis B: Environmental*, 189, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.047>
- Gao, X., Lu, K., Chen, J., Min, J., Zhu, D., & Tan, M. (2021). NiCoP–CoP heterostructural nanowires grown on hierarchical Ni foam as a novel electrocatalyst for efficient

- hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45), 23205–23213. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.155>
- Guo, P., Wu, J., Li, X. B., Luo, J., Lau, W. M., Liu, H., Sun, X. L., & Liu, L. M. (2018). A highly stable bifunctional catalyst based on 3D Co(OH)₂@NCNTs@NF towards overall water-splitting. *Nano Energy*, 47, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.02.032>
- Hui, B., Li, J., Lu, Y., Zhang, K., Chen, H., Yang, D., Cai, L., & Huang, Z. (2021). Boosting electrocatalytic hydrogen generation by a renewable porous wood membrane decorated with Fe-doped NiP alloys. *Journal of Energy Chemistry*, 56, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.07.037>
- Ji, Y., Xie, J., Yang, Y., Fu, X., Sun, R., & Wong, C. (2020). NiCoP 1D nanothorns grown on 3D hierarchically porous Ni films for high performance hydrogen evolution reaction. *Chinese Chemical Letters*, 31(3), 855–858. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2019.06.021>
- Kumbhar, V. S., Lee, H., Lee, J., & Lee, K. (2019). Interfacial growth of the optimal BiVO₄ nanoparticles onto self-assembled WO₃ nanoplates for efficient photoelectrochemical water splitting. *Journal of Colloid and Interface Science*, 557, 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.09.037>
- Li, F., Xu, R., Li, Y., Liang, F., Zhang, D., Fu, W. F., & Lv, X. J. (2019). N-doped carbon coated NiCo₂S₄ hollow nanotube as bifunctional electrocatalyst for overall water splitting. *Carbon*, 145, 521–528. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.065>
- Li, G., Li, L., & Lin, Z. (2021). CoP-anchored high N-doped carbon@graphene sheet as bifunctional electrocatalyst for efficient overall water splitting. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 46(35), 18224–18232.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.219>

Li, H., Chen, S., Zhang, Y., Zhang, Q., Zhang, Q., Jia, X., Gu, L., Sun, X., Song, L., & Wang, X. (2018). Systematic design of superaerophobic nanotube-array electrode comprised of transition-metal sulfides for overall water splitting. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04888-0>

Li, Y., Liu, Z., Zhang, J., Guo, Z., Xin, Y., & Zhao, L. (2019). 1D/0D WO₃/CdS heterojunction photoanodes modified with dual co-catalysts for efficient photoelectrochemical water splitting. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 493–501. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.178>

Lin, Y., Pan, Y., Liu, S., Sun, K., Cheng, Y., Liu, M., Wang, Z., Li, X., & Zhang, J. (2019). Construction of multi-dimensional core/shell Ni/NiCoP nano-heterojunction for efficient electrocatalytic water splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118039>

Liu, J., Yu, X., Liu, Q., Liu, R., Shang, X., Zhang, S., Li, W., Zheng, W., Zhang, G., Cao, H., & Gu, Z. (2014). Surface-phase junctions of branched TiO₂ nanorod arrays for efficient photoelectrochemical water splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 158–159, 296–300. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.04.032>

Lv, X., Tao, L., Cao, M., Xiao, X., Wang, M., & Shen, Y. (2018). Enhancing photoelectrochemical water oxidation efficiency via self-catalyzed oxygen evolution: A case study on TiO₂. *Nano Energy*, 44, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.12.024>

Radecka, M., Wnuk, A., Trenczek-Zajac, A., Schneider, K., & Zakrzewska, K. (2015).

- TiO₂/SnO₂ nanotubes for hydrogen generation by photoelectrochemical water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(1), 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.154>
- Seza, A., Soleimani, F., Naseri, N., Soltaninejad, M., Montazeri, S. M., Sadrnezhad, S. K., Mohammadi, M. R., Moghadam, H. A., Forouzandeh, M., & Amin, M. H. (2018). Novel microwave-assisted synthesis of porous g-C₃N₄/SnO₂ nanocomposites for solar water-splitting. *Applied Surface Science*, 440, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.133>
- Singh, T., Müller, R., Singh, J., & Mathur, S. (2015). Tailoring surface states in WO₃ photoanodes for efficient photoelectrochemical water splitting. *Applied Surface Science*, 347, 448–453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.126>
- Sumi, V. S., Sha, M. A., Arunima, S. R., & Shibli, S. M. A. (2019). Development of a novel method of NiCoP alloy coating for electrocatalytic hydrogen evolution reaction in alkaline media. *Electrochemical Acta*, 303, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.063>
- Yang, Z., He, R., Wu, H., Ding, Y., & Mei, H. (2021). Needle-like CoP/rGO growth on nickel foam as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(15), 9690–9698. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.114>
- Yu, Y., Chen, Q., Li, J., Rao, P., Li, R., Du, Y., Jia, C., Huang, W., Luo, J., Deng, P., Shen, Y., & Tian, X. (2022). Progress in the development of heteroatom-doped nickel phosphates for electrocatalytic water splitting. *Journal of Colloid and Interface Science*, 607, 1091–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.09.032>

- Zhang, J., Wu, C., Hou, K., Huang, M., & Guan, L. (2018). Mass production of Nickel@Carbon nanoparticles attached on single-walled carbon nanotube networks as highly efficient water splitting electrocatalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(33), 15687–15692. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.048>
- Zhang, J., Zhang, P., Wang, T., & Gong, J. (2015). Monoclinic WO₃ nanomultilayers with preferentially exposed (002) facets for photoelectrochemical water splitting. *Nano Energy*, *11*, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.10.021>
- Zhang, Y., Hao, X., Ma, X., Liu, H., & Jin, Z. (2019). Special Z-scheme CdS@WO₃ hetero-junction modified with CoP for efficient hydrogen evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(26), 13232–13241. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.168>
- Zhu, Q., Yu, C., & Zhang, X. (2019). Ti, Zn co-doped hematite photoanode for solar driven photoelectrochemical water oxidation. *Journal of Energy Chemistry*, *35*, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.10.012>