

Revisión sistemática de Celdas Electrolíticas con Biocátodos en la Producción de
Hidrógeno Verde a Escala Industrial para el Tratamiento de Aguas Residuales

Inés Nayely Herrera Manrique y María Paula Franco Ruiz

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Directora

Yuly Fernanda López Contreras

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, luz y sostén en mi camino, compañero fiel en cada desafío y guía constante en esta travesía profesional que emprendí con pasión desde el primer día.

A mis padres, Francy Ruiz y Dario Franco, mis pilares inquebrantables, cuyo amor incondicional y fe en mis capacidades nunca flaqueó, incluso en los momentos más difíciles. Este logro es también el suyo.

A mis hermanos, Juan y Santiago Franco, faros de inspiración, cuyo ejemplo de perseverancia y excelencia me impulsó a superarme cada día. Gracias por sus sabios consejos, por su mirada crítica que perfeccionó este trabajo, y por creer en mí cuando yo misma dudaba.

A mi leal compañera de cuatro patas Luna, cuyo amor silencioso fue bálsamo en las noches de estudio y alegría en los días de triunfo. Tu compañía hizo más ligera la carga y más dulce el camino.

A mi compañero de vida Kewin Aguilar, cómplice incansable desde el primer día. Gracias por tu apoyo inquebrantable y por convertir cada desafío en crecimiento compartido. Este triunfo lleva la marca de tu paciencia y esa complicidad que vuelve posible lo imposible.

Este logro, fruto de esfuerzo y dedicación, pertenece a todos ustedes, mi familia, mi refugio y mi mayor fortuna.

Maria P. Franco

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía constante, por sostenerme en los momentos de incertidumbre y por recordarme que cada esfuerzo tiene propósito.

A mis padres, por ser mi raíz y mi impulso. Por su amor que abraza incluso en la distancia, por su esfuerzo silencioso y constante, y por enseñarme que el verdadero valor de los logros está en el camino recorrido. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo misma dudaba, y por ser ejemplo de fuerza, entrega y fe.

A mi hermano, por ser compañía silenciosa y fuerza discreta. Por sus gestos, sus palabras o su presencia callada que tantas veces me sostuvieron sin pedirlo.

A Hela, mi compañera de cuatro patas, por su amor fiel, por estar ahí cuando el mundo parecía pesado, por sus miradas llenas de paz y su ternura inagotable.

A Pau, Emi y Mapu, por ser risas, desahogo, contención y alegría. Por demostrarme que la amistad verdadera no pide, solo está.

A mi pareja, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por su paciencia, por acompañarme con amor genuino en cada paso de este camino, por hacerme sentir que no estaba sola, incluso en los días más grises.

Y a mí, por no rendirme, por abrazar mis miedos, por avanzar a pesar de las dudas.

Porque este logro también es fruto de la fe que sembré en mí misma.

Inés N. Herrera

Agradecimientos

En este camino lleno de desafíos y crecimiento, quiero reconocer a todas las personas que Dios puso en mi vida para convertir este sueño en realidad. A cada una de ustedes, mis ángeles terrenales, que, con su apoyo incondicional, sus consejos y hasta sus hogares, hicieron posible que hoy alcance esta meta.

A mis padres y hermanos, mis cimientos y fortaleza, gracias por ser mi refugio, por su paciencia infinita y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Sus sacrificios y amor incondicional han sido el motor que impulsó cada uno de mis pasos.

A mi amiga y compañera de trabajo, Nayely Herrera, cómplice incondicional tanto en lo profesional como en lo personal. Gracias por ser mi apoyo, por esas noches de estudio compartidas, y por demostrarme que el compañerismo verdadero trasciende las paredes de la universidad. Tu amistad y colaboración han sido pilares fundamentales para alcanzar esta meta.

Finalmente, pero no menos importante, a mi directora Yuly Fernanda López Contreras, cuyo compromiso, sabiduría y comprensión trascendieron lo académico. Profesora Yuly, mil gracias por su paciencia, por adaptarse a mis tiempos y por creer en mí cuando las circunstancias eran adversas. Su mentoría ha dejado una huella imborrable en mi formación profesional y personal.

Este logro no es solo mío, es de todos ustedes que tejieron una red de apoyo inquebrantable. ¡Gracias por ser parte fundamental de esta historia!

Contenido

| | Pag |
|---|------------|
| 1. Introducción | 12 |
| 2. Objetivos | 13 |
| 2.1. Objetivo General | 13 |
| 2.2. Objetivos específicos | 13 |
| 3. Estado del arte | 14 |
| 4. Metodología | 17 |
| 4.1. Etapa 1: Filtrado de artículos científicos. | 17 |
| 4.2. Fase 2: Análisis temático y técnico. | 18 |
| 4.3. Fase 3: Análisis y evaluación de aspectos económicos, ambientales y sociales. | 19 |
| 5. Resultados | 20 |
| 5.1. Resultados de la búsqueda y selección de artículos | 20 |
| 5.2. Análisis de las redes bibliométricas | 21 |
| 5.3. Análisis comparativo entre diferentes métodos | 23 |
| 5.3.1. Celda de electrólisis microbiana con biocátodo (MEC) | 24 |
| 5.3.2. Electrólisis PEM (Membrana de intercambio de protones) | 25 |
| 5.3.3. Electrólisis alcalina (AWE) | 28 |
| 5.4. Resultados de escalado y rendimiento en MEC piloto | 31 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.5. | Análisis de los desafíos técnicos y oportunidades asociados con la implementación de esta tecnología | 36 |
| 5.5.1. | Baja densidad de corriente a gran escala..... | 36 |
| 5.5.2. | Estabilidad..... | 37 |
| 5.5.3. | Coste de materiales..... | 38 |
| 5.6. | Beneficios, limitaciones económicas, ambientales y sociales..... | 41 |
| 5.6.1. | Económicos | 41 |
| 5.6.2. | Ambientales..... | 42 |
| 5.6.3. | Sociales | 43 |
| 6. | Conclusiones | 45 |
| 7. | Referencias bibliográficas..... | 47 |
| 8. | Anexos | 53 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Parámetros técnicos clave de la celda de electrólisis microbiana con biocátodo (MEC). | 25 |
| Tabla 2 Parámetros técnicos clave de la electrólisis PEM. | 27 |
| Tabla 3 Parámetros técnicos clave de la electrólisis alcalina (AWE)..... | 28 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Esquema de una celda de electrólisis microbiana (MEC) para tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno. | 15 |
| Figura 2 Actividades por fases de la metodología aplicada..... | 17 |
| Figura 3 Esquema del proceso de filtrado y selección. | 21 |
| Figura 4 Artículos publicados por año relacionado con la producción de celdas electrolíticas con biocátodos para el tratamiento de agua residuales. | 23 |
| Figura 5 Relación entre el volumen del reactor y el rendimiento de MEC con biocátodos..... | 32 |
| Figura 6 Comparación de rendimiento de MEC piloto según configuración de reactor..... | 35 |
| Figura 7 Número de estudios que investigan el uso de MEC para el tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio (azul) y a escala piloto (amarillo). Datos obtenidos mediante búsqueda en Google Académico hasta 2019. | 40 |

Lista de apéndices

Apéndice A Análisis de las redes bibliométricas..... 53

Resumen

Título: Revisión sistemática de Celdas Electrolíticas con Biocátodos en la Producción de Hidrógeno Verde a Escala Industrial para el Tratamiento de Aguas Residuales.

Autor: María Paula Franco Ruiz, Inés Nayely Herrera Manrique.

Palabras claves: Celdas electrolíticas, hidrógeno verde, biocátodos, aguas residuales y sostenibilidad.

Descripción: La transición energética global ha intensificado la búsqueda de fuentes de energía renovables y sostenibles, entre las cuales el hidrógeno verde se posiciona como un vector energético estratégico por su potencial para sustituir combustibles fósiles y reducir las emisiones de carbono. Sin embargo, la producción de hidrógeno mediante electrólisis requiere mejoras en eficiencia energética para ser competitiva a gran escala. En este marco, las celdas de electrólisis microbiana (MEC) con biocátodos emergen como una tecnología innovadora al integrar microorganismos electroactivos capaces de reducir la energía necesaria para la electrólisis y, de forma simultánea, promover la remoción de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. Esta integración permite combinar la producción de hidrógeno verde con el tratamiento de efluentes, generando beneficios ambientales y energéticos de manera conjunta. La revisión sistemática abarcó un periodo de diez años e incluyó inicialmente 68 estudios, de los cuales 36 fueron seleccionados tras aplicar criterios de filtrado por título, resumen y palabras clave. Los resultados muestran que las MEC con biocátodos alcanzan eficiencias del 70–85 % en la producción de hidrógeno, con reducciones en el consumo energético de hasta 40 % en comparación con métodos convencionales. Además, se reportan eficiencias de remoción de contaminantes orgánicos del 80–90 % y una mayor estabilidad operativa cuando se emplean consorcios microbianos durante periodos superiores a 1.200 horas. No obstante, el escalado de esta tecnología presenta desafíos, ya que el rendimiento disminuye al aumentar el volumen de los reactores debido a limitaciones en la transferencia electrónica, pérdidas asociadas a procesos metanogénicos y resistencias internas. A pesar de ello, estrategias como la modularización de electrodos, el uso de materiales de alta conductividad y el control selectivo de comunidades microbianas se identifican como líneas de investigación clave para superar estas limitaciones.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Yuly López Contreras. Ingeniera Química.

Abstract

Title: Systematic review of Electrolytic Cells with Biocathodes in the Production of Green Hydrogen at Industrial Scale for Wastewater Treatment.

Author: Maria Paula Franco Ruiz, Ines Nayely Herrera Manrique.

Keywords: Electrolytic cells, green hydrogen, biocathodes, wastewater, and sustainability.

Description: The global energy transition has intensified the search for renewable and sustainable energy sources, among which green hydrogen is positioned as a strategic energy vector due to its potential to replace fossil fuels and reduce carbon emissions. However, hydrogen production via electrolysis requires improvements in energy efficiency to be competitive on a large scale. In this context, microbial electrolysis cells (MECs) with biocathodes are emerging as an innovative technology by integrating electroactive microorganisms capable of reducing the energy required for electrolysis and, simultaneously, promoting the removal of organic pollutants present in wastewater. This integration allows for combining green hydrogen production with wastewater treatment, generating both environmental and energy benefits. The systematic review covered a ten-year period and initially included 68 studies, of which 36 were selected after applying filtering criteria based on title, abstract, and keywords. The results show that MECs with biocathodes achieve hydrogen production efficiencies of 70–85%, with energy consumption reductions of up to 40% compared to conventional methods. Furthermore, organic contaminant removal efficiencies of 80–90% and greater operational stability are reported when microbial consortia are used for periods exceeding 1,200 hours. However, scaling up this technology presents challenges, as performance decreases with increasing reactor volume due to limitations in electron transfer, losses associated with methanogenic processes, and internal resistances. Nevertheless, strategies such as electrode modularization, the use of high-conductivity materials, and selective control of microbial communities are identified as key research areas to overcome these limitations.

*Bachelor Thesis.

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Yuly F. López Contreras. Chemical Engineer.

1. Introducción

La transición hacia energías limpias y sostenibles ha cobrado una importancia crucial frente a los retos ambientales y energéticos actuales. En este contexto, el tratamiento de aguas residuales a nivel industrial enfrenta desafíos relacionados con el alto consumo energético, los costos operativos y la eficiencia en la eliminación de contaminantes (Universidad Nacional de Colombia, 2019). Para abordar estos desafíos, el hidrógeno verde surge como una alternativa prometedora para reemplazar las fuentes de energía fósil y reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Este se produce sin emisiones de carbono mediante la electrólisis del agua con fuentes renovables (European Commission, 2020). Su atractivo radica en que, al realizar la combustión, solo genera agua como subproducto, lo que lo convierte en un combustible limpio y ambientalmente favorable. En este contexto, y ante el aumento de los costos energéticos y mayor conciencia ambiental, las industrias de tratamiento de aguas residuales deben explorar alternativas para reducir su gasto neto de energía (Noori et al., 2024).

Teniendo en cuenta que la tecnología de MEC (Celda de electrólisis microbiana) aún enfrenta retos para su escalabilidad, su desarrollo y optimización podrían allanar el camino hacia una producción sostenible y comercialmente viable de hidrógeno mediante biocátodos (Noori et al., 2024). La contribución de este trabajo de grado consiste en identificar y analizar los principales desafíos y barreras que inciden en la viabilidad de las celdas electrolíticas con biocátodos para la producción de hidrógeno verde a escala industrial en el contexto del tratamiento de aguas residuales.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar la viabilidad de celdas electrolíticas con biocátodos en la producción de hidrógeno verde enfocado en el tratamiento de aguas residuales industriales.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión sistemática de la literatura científica sobre la eficiencia de celdas electrolíticas con biocátodos, en comparación con otros métodos actuales de producción de hidrógeno verde.
- Describir los desafíos técnicos y oportunidades asociados con la implementación de esta tecnología.
- Identificar los aspectos económicos, medioambientales y sociales de la producción de hidrógeno verde mediante celdas electrolíticas con biocátodos.

3. Estado del arte

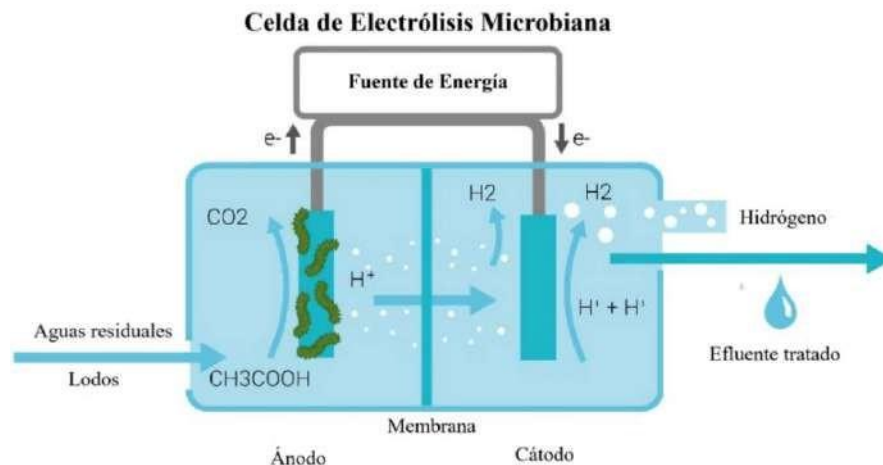
La ingeniería medioambiental del siglo XXI propone un enfoque renovado que considera las aguas residuales no como un desecho, sino como un recurso valioso del cual es posible recuperar tanto materiales como energía. A nivel internacional, diversas investigaciones han demostrado avances significativos en la eficiencia de las celdas electrolíticas microbianas (MEC) mediante el desarrollo de biocátodos optimizados con microorganismos electroactivos. Este enfoque ha permitido aumentar la producción de hidrógeno y reducir los costos operativos. En Europa, estudios han explorado configuraciones avanzadas de reactores y materiales conductores con el fin de mejorar la transferencia electrónica y la estabilidad de los biocátodos (Guerrero-Sodric et al., 2024).

A la par de estos avances, la aplicación de la tecnología MEC ha mostrado resultados prometedores en entornos de laboratorio y proyectos piloto, su aplicabilidad a escala industrial presenta desafíos técnicos y económicos. Investigaciones han demostrado que la producción de hidrógeno a partir de aguas residuales en celdas de electrólisis microbiana es viable en sistemas piloto (Noori et al., 2024). Sin embargo, la baja densidad de corriente y la estabilidad de los biocátodos siguen siendo limitantes clave para su implementación masiva.

Ante estos desafíos, a nivel mundial, existen iniciativas que buscan integrar las MEC en plantas de tratamiento de aguas residuales para aprovechar la materia orgánica como sustrato y generar biohidrógeno de manera sostenible, como se muestra en la Figura 1 (Radhika et al., 2022). En Asia y Norteamérica, se han desarrollado sistemas híbridos que combinan MEC con tecnologías complementarias como la digestión anaerobia para maximizar la recuperación de energía y mejorar la eficiencia global de los sistemas de tratamiento (Hua et al., 2018).

Figura 1

Esquema de una celda de electrólisis microbiana (MEC) para tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno.



Nota. Tomado de *Microbial Electrolysis Cells for Decentralised Wastewater Treatment: The Next Steps*, por T. Fudge et al., 2021, *Water*, 13(4), 445. <https://doi.org/10.3390/w13040445>.

No obstante, uno de los principales desafíos para la implementación de las MEC a escala industrial es la optimización de los materiales de los electrodos, así como la estabilidad de los biocátodos en condiciones reales de operación. Investigaciones recientes han explorado diversas estrategias para mejorar la conductividad del cátodo y aumentar la eficiencia global de las MEC, incluyendo el uso de catalizadores basados en materiales abundantes y económicos como hierro y cobalto. Además, se han desarrollado recubrimientos nanoestructurados, como óxidos metálicos y grafeno funcionalizado, que reducen el sobrepotencial catódico y optimizan la transferencia de electrones (Tang et al., 2022).

Desde el punto de vista de la escalabilidad, se han propuesto configuraciones modulares y reactores de flujo continuo que facilitan la integración con plantas de tratamiento de aguas residuales, con resultados prometedores en proyectos piloto que alcanzan producciones de hasta

0,2 m³ H₂/m³·día, aunque todavía por debajo de los niveles industriales (Radhika et al., 2022). No obstante, persisten retos significativos como el incremento de la densidad de corriente, la reducción de costos asociados a materiales y la estabilidad de los biocátodos en operación prolongada, aspectos que deben ser resueltos para garantizar la viabilidad de estas tecnologías frente a alternativas consolidadas como la electrólisis alcalina y PEM (Membrana de intercambio protónico) (International Energy Agency, 2022).

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo de grado busca contribuir a cerrar la brecha entre la investigación académica y la aplicación práctica mediante una revisión sistemática orientada a consolidar los avances, identificar las limitaciones y evaluar las oportunidades para el escalado industrial de celdas electrolíticas con biocátodos en la producción de hidrógeno verde.

4. Metodología

En el desarrollo de esta revisión sistemática, se tuvieron en cuenta tres fases: i) Compilación y depuración de artículos científicos encontrados en bases de datos electrónicas; ii) Análisis temático y técnico; iii) Análisis y evaluación de aspectos económicos, ambientales y sociales; tal y como se muestra a continuación en la Figura 2.

Figura 2

Actividades por fases de la metodología aplicada.



4.1. Etapa 1: Filtrado de artículos científicos.

La búsqueda se realizó en las bases de datos, Science direct, Taylor & Francis, Web of Science y herramientas IA como Gemini y Chat Gpt, donde se tuvo en cuenta parámetros específicos para su selección y estudio, tales como: producción de hidrógeno, viabilidad de celdas electrolíticas en producción de hidrógeno y con el uso de aguas residuales. Para ello, se tomaron en cuenta cuatro palabras: “Hydrogen”, “Electrolytic Cells”, “Water Treatment” y “wastewater.

Luego se seleccionaron artículos que cumplieran con los siguientes parámetros:

- Contenían alguna de las palabras, términos clave o raíces usadas en la búsqueda avanzada, tales como: “Hydrogen”, “Electrolytic Cells”, “Water Treatment”, y “wastewater”.
- Desarrollo de un proceso de tratamiento de aguas con celdas electrolíticas.
- Producción de biohidrógeno a partir de residuos.
- Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales domésticas en una celda de electrólisis microbiana a escala piloto.

Así mismo, se revisaron los resúmenes de los artículos para identificar información relevante según los objetivos específicos y luego la totalidad de los artículos. Los artículos fueron organizados en el gestor bibliográfico Mendeley, extrayendo datos clave para crear una base de datos en Drive.

Esta incluía detalles como resultados experimentales, metodologías, conclusiones y el impacto de las celdas electrolíticas con biocátodos en la producción de hidrógeno verde, así como su eficiencia y sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales. Asimismo, se analizaron distintas escalas de operación para evaluar la viabilidad industrial.

Esta base de datos resultó favorable para realizar un análisis comparativo de los métodos convencionales y biológicos de generación de hidrógeno, así como para identificar los desafíos y oportunidades que presenta el uso de biocátodos en el contexto de la transición energética y la gestión de recursos hídricos.

4.2. Fase 2: Análisis temático y técnico.

De cada artículo seleccionado, se extrajo información clave sobre los materiales del biocátodo, los microorganismos electroactivos utilizados, las configuraciones de celda, el rendimiento energético, así como las limitaciones técnicas y su escalabilidad. Esta información

permitió identificar las estrategias más efectivas y los factores que influyen en la eficiencia del sistema.

Posteriormente, los estudios se organizaron en una clasificación temática según los principales desafíos identificados: tipo de material, estabilidad del biocátodo, densidad de corriente, eficiencia operativa y mantenimiento requerido. Por último, se ejecutó la discusión de resultados en relación con estudios previos, resaltando avances, desafíos y oportunidades en la implementación industrial de esta tecnología, mediante la elaboración de tablas comparativas, a partir del análisis de los artículos seleccionados y sus parámetros.

4.3. Fase 3: Análisis y evaluación de aspectos económicos, ambientales y sociales.

Se recopiló información de estudios que abordan la viabilidad económica, ambiental y social de las celdas electrolíticas con biocátodos, evaluando su potencial frente a tecnologías convencionales. Se analizaron casos de estudio que permiten comparar costos, impacto ambiental y grado de aceptación en distintos contextos industriales. A partir de estos datos, se realizó una síntesis de los principales hallazgos, con el fin de construir un marco general sobre la sostenibilidad y el potencial de adopción de esta tecnología en el tratamiento de aguas residuales.

5. Resultados

Los resultados de la revisión sobre celdas electrolíticas con biocátodos para producir hidrógeno verde en aguas residuales se organizaron según los objetivos específicos del trabajo, permitiendo comparar la eficiencia energética, los materiales y microorganismos utilizados, así como analizar los principales retos técnicos y las implicaciones económicas, ambientales y sociales de esta tecnología emergente.

Los resultados se estructuran en tres secciones: la primera aborda el desempeño técnico y la eficiencia comparativa entre diferentes métodos para producción de hidrógeno verde; la segunda sección identifica los desafíos técnicos asociados con la implementación de esta tecnología a escala industrial; y la tercera analiza los beneficios, limitaciones desde una perspectiva económico-ambiental y social.

Esta organización permite establecer con base científica, la viabilidad de los biocátodos como alternativa sostenible en la transición energética.

5.1. Resultados de la búsqueda y selección de artículos

En el proceso de búsqueda de artículos en las bases de datos electrónicas, Science direct, Taylor & Francis, Web of Science y herramientas IA como Gemini y Chat GPT. Se obtuvieron 68 artículos, luego se aplicaron filtros de inclusión y exclusión para depurar la información. En el primer filtro, se descartaron 12 artículos que no cumplían con los criterios definidos: algunos no abordaban la producción de hidrógeno, otros no consideraban la viabilidad de celdas electrolíticas en dicho proceso o simplemente trataban el uso de aguas residuales de manera general, sin incluir análisis experimentales. Asimismo, se eliminaron publicaciones fuera del periodo de estudio

establecido (2015–2025), así como documentos duplicados, incompletos o sin acceso al texto completo.

Una vez depurada la información, se conservaron únicamente los artículos que cumplían con los requisitos de pertinencia temática y metodológica. Para su organización, se aplicaron dos filtros adicionales: uno basado en el título, permitió seleccionar aquellos que cumplían con los parámetros previamente establecidos, donde quedaron 37 artículos; posteriormente, el tercer filtro, realizando la revisión del texto completo del artículo para identificar su relación con los objetivos específicos. Como resultado de este proceso, se seleccionaron finalmente 36 estudios para el análisis y desarrollo de la respectiva revisión sistemática, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Esquema del proceso de filtrado y selección.



5.2. Análisis de las redes bibliométricas

En la Figura 4 se presenta la evolución de las publicaciones en el periodo comprendido entre 2015 y 2025. Se observa que en los años 2015 y 2018 no se registraron artículos que

cumplieran con los criterios de inclusión establecidos. A partir de 2016 se evidencia un crecimiento progresivo, alcanzando un primer pico en 2020 con seis publicaciones. Cabe destacar que dos artículos adicionales no aparecen en la gráfica, ya que no contaban con información disponible sobre el año de publicación.

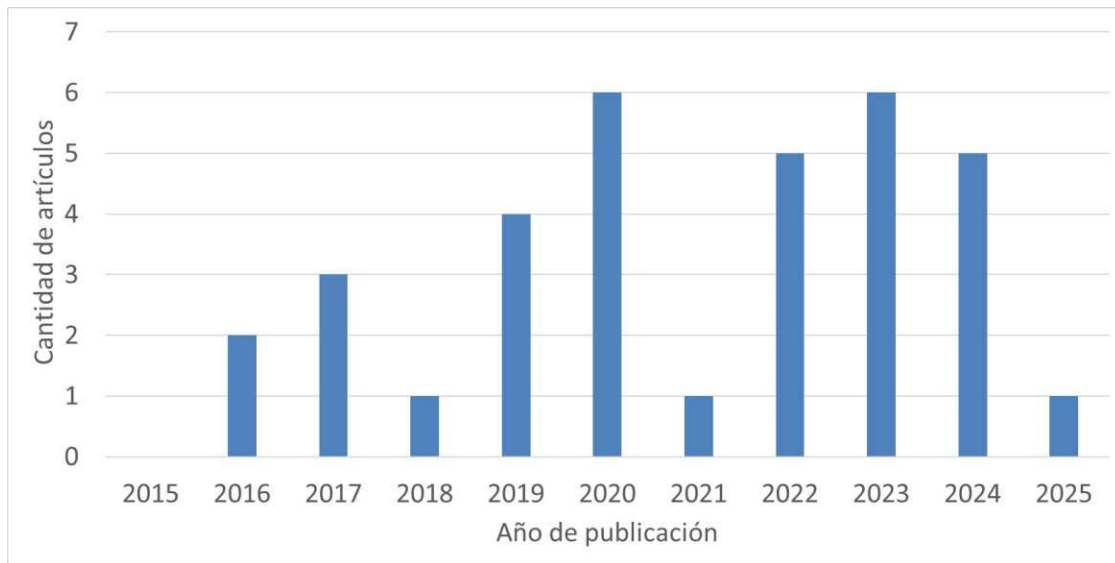
Posteriormente, en 2021 se presenta una disminución significativa con un solo artículo, seguida de una recuperación en 2022 (cinco artículos) y un nuevo pico en 2023 con seis publicaciones. En 2024 se mantiene un nivel alto con cinco artículos, mientras que en 2025 únicamente se ha registrado un artículo al momento de la recolección de la información.

En términos generales, los resultados evidencian una tendencia creciente en la última década, con dos picos relevantes en 2020 y 2023, lo que refleja un interés sostenido en la temática. Las caídas observadas en determinados años pueden explicarse por distintos factores. En 2015 y 2018, corresponden a etapas iniciales de consolidación, cuando la literatura disponible era aún limitada y muchos estudios no cumplían con los criterios metodológicos definidos. La reducción en 2021, tras el máximo de 2020, se asocia tanto a la mayor complejidad de las investigaciones experimentales, que requieren más tiempo para su desarrollo, como a retrasos derivados de la pandemia de COVID-19.

En cuanto a 2024, la ligera disminución respecto a 2023 no indica una pérdida de interés, sino una diversificación de las líneas de investigación hacia enfoques complementarios, lo que reduce el número de artículos directamente alineados con esta revisión. Finalmente, la baja productividad registrada en 2025 responde principalmente al desfase natural de los procesos editoriales, dado que muchos trabajos de este año aún se encuentran en evaluación o en prensa y no habían sido indexados en las bases consultadas.

Figura 4

Artículos publicados por año relacionado con la producción de celdas electrolíticas con biocátodos para el tratamiento de agua residuales.

**5.3. Análisis comparativo entre diferentes métodos**

Teniendo en cuenta la revisión realizada, la producción de hidrógeno verde se logra típicamente mediante electrólisis del agua usando energía renovable. Actualmente, dos tecnologías de electrólisis de agua dominan el ámbito comercial: la electrólisis alcalina (AWE, por *Alkaline Water Electrolysis*) y la electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM, *Proton Exchange Membrane*). En años recientes ha surgido una alternativa bio-electroquímica innovadora: la celda de electrólisis microbiana (MEC, *Microbial Electrolysis Cell*) con biocátodo, la cual emplea microorganismos para catalizar la evolución de hidrógeno utilizando corrientes eléctricas bajas y materia orgánica como sustrato (Noori et al., 2024).

Se compararon estas tres tecnologías en cuanto a eficiencia y parámetros de desempeño clave. Se analizan su consumo específico de energía, densidad de corriente, eficiencia energética

(a nivel de celda *stack* y planta), pureza del hidrógeno producido, costos estimados, y grado de escalabilidad empleando el nivel de madurez tecnológica, TRL.

5.3.1. Celda de electrólisis microbiana con biocátodo (MEC)

Una MEC es un sistema bioelectroquímico en el que microorganismos electroactivos oxidan materia orgánica en el ánodo, liberando electrones y protones. Mediante la aplicación de una pequeña corriente externa (0.2–0.8 V) estos electrones se dirigen al biocátodo, donde un consorcio microbiano o enzimas catalizan la producción de hidrógeno (Rozenfeld et al., 2017; Jesús et al., 2016). Esta integración bioelectroquímica permite que parte de la energía de electrólisis provenga de la energía química del sustrato, reduciendo así el consumo eléctrico respecto a tecnologías convencionales (Noori et al., 2024).

Las MEC pueden operar con consumos eléctricos de 33–117 kWh/kg H₂, e incluso < 30 kWh/kg en condiciones optimizadas, lo que supone reducciones de hasta el 25 % frente a la electrólisis abiótica (Ren et al., 2024). La eficiencia eléctrica neta se sitúa entre el 70–78 % considerando únicamente la energía suministrada externamente (Nasser et al., 2022). Sin embargo, presentan densidades de corriente limitadas (0.3–50 A/m²), con tasas de producción de H₂ generalmente inferiores a las obtenidas con cátodos metálicos (Wang et al., 2022).

En condiciones controladas, las MEC pueden alcanzar purezas de hidrógeno de 95–100 % (Son et al., 2020), aunque diseños de una sola cámara pueden reducirla a < 50 % por mezcla con CO₂ y metano (Sharma et al., 2024). A nivel de costos, estudios piloto estiman valores de 5.6–6.6 USD/kg H₂ (Chou, 2023), mientras que en laboratorio se han proyectado costos operativos cercanos a 3.2 USD/kg H₂ (Batlle-Vilanova et al., 2016). Actualmente, su madurez tecnológica es

TRL 4–5, con aplicaciones limitadas a investigación y pilotos de pequeña escala (Jiang et al., 2023).

Tabla 1

Parámetros técnicos clave de la celda de electrólisis microbiana con biocátodo (MEC).

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Consumo eléctrico (kWh/kg H₂) | 33–117 (óptimos < 30) |
| Eficiencia energética (% LHV) | 70–78 |
| Densidad de corriente | 0.3–50 A/m ² |
| Pureza de H₂ (%) | 95–100 (puede caer < 50 % en diseño de una cámara) |
| Costo estimado (USD/kg H₂) | 5.6–6.6 (piloto) ~3.2 (laboratorio optimizado) |
| Nivel de madurez tecnológica | TRL 4–5 |

Nota. Adaptado de Noori et al. (2024); Batlle-Vilanova et al. (2016); Son et al. (2020); Fudge et al. (2021); Chou (2023); Ren et al. (2024); Wang et al. (2022); Sharma et al. (2024); Jiang et al. (2023).

En general, la MEC representa una vía prometedora para la producción de hidrógeno verde con menor consumo eléctrico y valor añadido en tratamiento de efluentes, aunque su baja densidad de corriente, la complejidad para mantener purezas elevadas en diseños de gran escala y la necesidad de reducir costos de materiales son desafíos críticos para su comercialización (Noori et al., 2024; Fudge et al., 2021).

5.3.2. Electrólisis PEM (Membrana de intercambio de protones)

La electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) emplea una membrana polimérica conductora de protones que actúa como electrolito y separador de gases. En el ánodo, el agua ultrapura se oxida liberando oxígeno, protones y electrones; estos últimos circulan por un circuito externo, mientras que los protones atraviesan la membrana para recombinarse en el cátodo

formando hidrógeno (S. K. Kumar & Himabindu, 2019; C. Wang & Feng, 2023). Esta membrana impide la mezcla de gases, permitiendo purezas superiores al 99.9 % y eficiencias de ~65 % (LHV) a densidades de corriente de 1–2 A/cm² (U.S. Department of Energy, 2024).

Una ventaja de la PEM es su capacidad de operar a altas densidades de corriente, entre 10 000 y 20 000 A/m² (Brauns & Turek, 2020), lo que permite sistemas más compactos y modulares. Produce hidrógeno de altísima pureza (99.999 %) directamente, sin necesidad de purificación adicional (Nasser et al., 2022).

Históricamente, su limitación ha sido el alto costo por uso de materiales nobles, con un CAPEX (gasto en capital que una empresa realiza para adquirir, mejorar o mantener activos fijos y de larga duración) actual de ~\$2000/kW y costos de H₂ de 5–7 USD/kg. Sin embargo, la reducción de costos y el aumento de la producción en masa podrían llevarla a ~2 USD/kg hacia 2026 (U.S. Department of Energy, 2024). Su madurez tecnológica se encuentra en TRL 8–9, con plantas operativas de hasta 100 MW en construcción (U.S. Department of Energy, 2024).

Si bien los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) representan una de las tecnologías más consolidadas para la producción de hidrógeno verde, su operación requiere el uso de agua ultrapura (conductividad <1 μS/cm, TOC <50 μg/L) para evitar la degradación de la membrana y la contaminación de los catalizadores, lo que implica altos costos asociados al pretratamiento del agua (Ultrapure Water For 50 MW PEM Electrolyzer, s. f.). Esta exigencia limita su aplicación directa en el tratamiento de aguas residuales, ya que estos efluentes contienen iones, compuestos orgánicos e inorgánicos que comprometen el desempeño del sistema. (Becker et al., 2023)

Por otra parte, las celdas electrolíticas microbianas (MEC) han sido diseñadas justamente para operar con aguas residuales como sustrato, aprovechando su carga orgánica para la generación de biohidrógeno y al mismo tiempo contribuyendo a la depuración del agua (Noori et al., 2024; Radhika et al., 2022). De esta manera, mientras los sistemas PEM destacan por su madurez tecnológica y alta eficiencia bajo condiciones estrictamente controladas, las MEC ofrecen un enfoque innovador y sostenible que integra la producción de hidrógeno con el tratamiento de efluentes, aunque aún presentan retos en cuanto a estabilidad y escalado.

Tabla 2

Parámetros técnicos clave de la electrólisis PEM.

| Parámetro | Valor |
|---|--|
| Consumo eléctrico (kWh/kg H₂) | 50–55 (óptimos ~43) |
| Eficiencia energética (% LHV) | ~65 (hasta ~70–77 en condiciones optimizadas) |
| Densidad de corriente | 1–2 A/cm ² (hasta 3 A/cm ²) |
| Pureza de H₂ (%) | 99.999 |
| Costo estimado (USD/kg H₂) | 5–7 (meta: ~2 hacia 2026) |
| Nivel de madurez tecnológica | TRL 8–9 |

Nota. Adaptado de U.S. Department of Energy (2024); S. K. Kumar & Himabindu (2019); C. Wang & Feng (2023); Brauns & Turek (2020); Nasser et al. (2022); Mallapragada & Rubin (2022).

En síntesis, la PEM combina alta pureza de hidrógeno, operación a densidades de corriente elevadas y flexibilidad para integrar energías renovables intermitentes, aunque su dependencia de materiales nobles y su mayor CAPEX frente a AWE siguen siendo retos clave para su despliegue masivo (U.S. Department of Energy, 2024).

5.3.1. Electrólisis alcalina (AWE)

La electrólisis alcalina (AWE) es la tecnología más tradicional y madura para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua. Utiliza electrodos de níquel u otros metales no preciosos sumergidos en una solución concentrada de KOH o NaOH (20–40 %), separados por un diafragma que evita la mezcla de gases producidos (Nasser et al., 2022). Este sistema, usado industrialmente desde mediados del siglo XX, es ampliamente reconocido por su fiabilidad y disponibilidad comercial (Buttler & Spliethoff, 2017).

En condiciones típicas, los electrolizadores alcalinos modernos operan a 1.8–2.0 V, alcanzando eficiencias del ~65 % (LHV) y consumos de 50–55 kWh/kg H₂ (U.S. Department of Energy, 2024). Pueden alcanzar hasta ~77 % (LHV) en escenarios optimizados (Brauns & Turek, 2020). Su densidad de corriente industrial usual se sitúa entre 0.4–0.6 A/cm², inferior a la del PEM, debido a limitaciones de transporte iónico en medio alcalino (Brauns & Turek, 2020).

El hidrógeno producido tiene purezas de 99.5–99.9 %, pudiendo llegar a 99.999 % tras purificación (Lopez et al., 2023). El costo estimado de producción está en el rango de 4–6 USD/kg H₂, con una ventaja de menor inversión inicial frente a PEM, gracias al uso de materiales no nobles y un diseño más sencillo (U.S. Department of Energy, 2024). La tecnología está en nivel de madurez tecnológica TRL 9, con instalaciones comerciales que van desde módulos de pocos kW hasta plantas de más de 100 MW (Buttler & Spliethoff, 2017).

Tabla 3

Parámetros técnicos clave de la electrólisis alcalina (AWE).

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| Consumo eléctrico (kWh/kg H₂) | 50–55 |

| | |
|--|--|
| Eficiencia energética (% LHV) | ~65 (hasta ~77 en condiciones óptimas) |
| Densidad de corriente | 0.4–0.6 A/cm ² (hasta 0.8 A/cm ²) |
| Pureza de H₂ (%) | 99.5–99.9 (hasta 99.999 con purificación) |
| Costo estimado (USD/kg H₂) | 4–6 |
| Nivel de madurez tecnológica | TRL 9 |

Nota. Adaptado de U.S. Department of Energy (2024); Nasser et al. (2022); Brauns & Turek (2020); Lopez et al. (2023); Buttler & Spliethoff (2017).

La AWE es una tecnología consolidada, fiable y con costos de inversión relativamente bajos, ideal para proyectos a gran escala. Su principal limitación frente a PEM es la menor densidad de corriente, lo que implica equipos más voluminosos, aunque los desarrollos en catalizadores y membranas alcalinas (AEM) podrían incrementar su competitividad en el futuro (EPRI Home, s. f.; Technical Targets for Liquid Alkaline Electrolysis, s. f.).

Esto es debido a que las membranas de intercambio aniónico (AEM) posibilitan el uso de electrocatalizadores relativamente económicos basados en metales de transición como Ni, Fe o Co (Kim et al., 2025), en lugar de los costosos metales nobles como Pt o Ir empleados en tecnologías PEM (Chen et al., 2020). Además, operan en medio alcalino y pueden usar agua desionizada o soluciones diluidas, lo que reduce aún más los costos y complejidad del sistema. El entorno alcalino permite materiales estructurales más baratos (como acero inoxidable) en lugar de Ti, contribuyendo a una reducción general en los costos de construcción y operación (AEM permite diseño más asequible) (Luo et al., 2023)

La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua puede realizarse con diversas tecnologías, cada una con características técnicas, niveles de madurez y costos distintos. Las tres más relevantes en el panorama actual son la celda de electrólisis microbiana con biocátodo (MEC), la electrólisis alcalina (AWE) y la electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM).

La MEC es una tecnología emergente que aprovecha la energía química de materia orgánica para reducir el consumo eléctrico externo, mientras que AWE y PEM son tecnologías consolidadas que emplean principios electroquímicos convencionales con diferentes tipos de electrolito y separadores. La comparación de sus parámetros clave permite evaluar su viabilidad técnica y económica, así como su potencial de escalabilidad.

Teniendo en cuenta las tablas: 1, 2 y 3, las celdas electroquímicas microbianas con biocátodos (MEC) presentan ventajas técnicas frente a la electrólisis alcalina (AWE) y la electrólisis PEM cuando existe disponibilidad de sustratos orgánicos presentes en aguas residuales, entendidos como compuestos biodegradables (carbohidratos, proteínas y lípidos) que pueden ser oxidados por microorganismos electrogénicos. Esto se debe a que aprovechan la energía química del sustrato para generar parte de los electrones necesarios, reduciendo el consumo eléctrico externo y, de forma simultánea, realizando tratamiento de efluentes, lo que representa un doble beneficio de valorización: depuración de aguas y producción de hidrógeno (Logan et al., 2019).

En contraste, los niveles de contaminación característicos de las aguas residuales con conductividades superiores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y contenidos de carbono orgánico total (TOC) de decenas a cientos de mg/L exceden ampliamente los límites de operación de los electrolizadores convencionales. En la electrólisis PEM se requiere agua ultrapura con conductividad inferior a 1

$\mu\text{S}/\text{cm}$ (Microsiemens por centímetro), pues la presencia de sales y materia orgánica degrada la membrana y afecta el transporte protónico (Becker et al., 2023).

De forma similar, la electrólisis alcalina precisa soluciones preparadas con agua de alta pureza, con conductividades cercanas a $0,1\text{--}1 \mu\text{S}/\text{cm}$, para prevenir incrustaciones, corrosión y pérdidas de eficiencia (U.S. Department of Energy, 2024). Por tanto, mientras PEM y AWE no son viables con aguas residuales como insumo, las MEC aprovechan directamente estos efluentes, combinando valorización energética y depuración.

Diversos estudios han documentado que las MEC pueden operar con consumos energéticos de $33\text{--}117 \text{ kWh}/\text{kg H}_2$, alcanzando valores optimizados inferiores a $30 \text{ kWh}/\text{kg}$, lo que implica una reducción significativa frente a las tecnologías AWE y PEM, cuyo consumo promedio bajo condiciones comerciales se encuentra en el rango de $50\text{--}55 \text{ kWh}/\text{kg H}_2$ (U.S. Department of Energy, 2024).

Asimismo, las MEC han registrado eficiencias eléctricas netas superiores al 70 % en condiciones de laboratorio optimizadas (Villano et al., 2017), consolidándose como una alternativa con alto potencial para integración en procesos de tratamiento de aguas y producción descentralizada de hidrógeno.

5.4. Resultados de escalado y rendimiento en MEC piloto.

Los estudios de escalado de celdas de electrólisis microbiana (MEC) con biocátodos han evidenciado que, si bien en condiciones de laboratorio se alcanzan altos rendimientos en producción de hidrógeno, las tasas disminuyen considerablemente al aumentar el volumen de operación y utilizar aguas residuales reales. En sistemas de laboratorio ($<1 \text{ L}$) alimentados con sustratos sintéticos, se han reportado tasas superiores a $7 \text{ L} * \text{L}_R^{-1} * \text{día}^{-1}$ (Litro de hidrógeno

producido por litro de volumen de reactor, por día) y densidades de corriente mayores a $100 A * M^{-3}$.

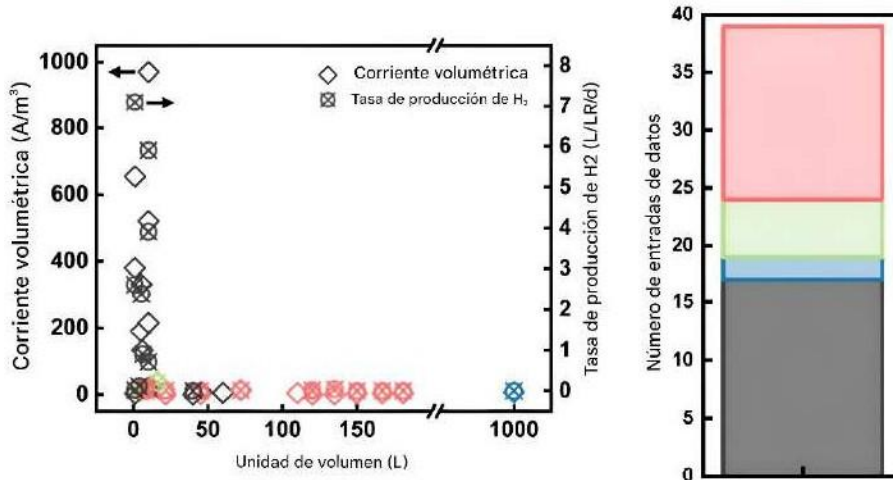
Sin embargo, en reactores piloto con volúmenes superiores a 10 L, las tasas típicamente no superan $1 L * L_R^{-1} * día^{-1}$ (Jiang et al., 2023). Este comportamiento se observa claramente en la relación inversa entre el volumen del reactor y la densidad de corriente/tasa de producción de hidrógeno reportada en diferentes estudios de MEC piloto (Figura 5), donde los sistemas de mayor escala presentan pérdidas significativas de rendimiento frente a los de laboratorio.

El término aguas residuales reales se refiere a efluentes provenientes de fuentes domésticas, municipales, industriales o agropecuarias que no han sido modificados artificialmente en laboratorio, a diferencia de los sustratos sintéticos compuestos por soluciones simples de glucosa o acetato. Estas aguas se caracterizan por una elevada variabilidad en su composición y suelen evaluarse mediante parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBOs), el contenido de sólidos suspendidos totales (SST), nutrientes (N y P), así como la conductividad y el pH.

En la mayoría de los estudios piloto, las aguas residuales reales empleadas incluyen efluentes de cervecerías, bodegas, plantas de tratamiento municipales y purinas animales, con concentraciones de DQO que pueden variar desde valores moderados ($< 800 mg * L^{-1}$) hasta niveles superiores a $2.000 mg * L^{-1}$. Como referencia, para que un efluente tratado cumpla con los estándares de descarga ambiental, se requiere que la DQO final sea inferior a $120 mg * L^{-1}$, umbral que solo algunos sistemas MEC han conseguido alcanzar.

Figura 5

Relación entre el volumen del reactor y el rendimiento de MEC con biocátodos.



Nota. Resumen de estudios piloto de MEC categorizados por volúmenes de operación, configuraciones y sustratos anódicos. La figura muestra la corriente volumétrica (diamantes) y la tasa de producción de H₂ (círculo con cruz) de reactores piloto de MEC con diferentes volúmenes unitarios. El volumen unitario se definió como el volumen intacto más pequeño del reactor; para los módulos de reactor, corresponde al volumen de cada módulo. Adaptado del panel C, figura 5 del Scale-Up and Techno-Economic Analysis of Microbial Electrolysis Cells for Hydrogen Production from Wastewater, por J. Jiang, J. A. Lopez-Ruiz, Y. Bian, D. Sun, Y. Yan, X. Chen, J. Zhu, H. D. May y Z. J. Ren, 2023, Water Research, 234, 119932. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119932>

En particular, la Figura 5 evidencia que, conforme aumenta el volumen del reactor, la densidad de corriente y la tasa de producción de hidrógeno disminuyen de forma notable. Este patrón confirma que el escalado introduce pérdidas de rendimiento relacionadas con limitaciones en la transferencia electrónica y fenómenos de inhibición microbiana, aspectos críticos a considerar en el diseño de MEC a gran escala.

Un ejemplo representativo es el reactor de 1 000 L desarrollado por Cusick et al. (2011), citado en Jiang et al. (2023), compuesto por 24 módulos de electrodos y operado durante más de 100 días, el cual presentó una tasa de producción de hidrógeno de $0,015 L * L_R^{-1} * día^{-1}$ debido a la inhibición generada por procesos metanogénicos.

Estos procesos corresponden a la actividad de arqueas metanogénicas que consumen el hidrógeno como fuente de energía y lo convierten en metano (CH_4), compitiendo directamente con la recuperación del gas en el cátodo. La prevalencia de esta ruta metabólica se ve favorecida en sistemas de gran escala por la mayor retención de biomasa y el contacto prolongado entre H_2 disuelto y comunidades microbianas.

Para mitigar este efecto, se han propuesto estrategias como el control estricto de las condiciones de operación (pH, potencial aplicado, tiempo de retención hidráulica), el uso de materiales catódicos selectivos, la aplicación de inhibidores específicos de metanogénesis o el acoplamiento del MEC con procesos de separación que permitan extraer el hidrógeno rápidamente antes de su consumo biológico.

Más allá de la metanogénesis, los resultados reflejan que, si bien la eliminación de contaminantes orgánicos es consistente en diversas escalas, la generación de corriente y la recuperación de H_2 se ven afectadas por factores como la baja conductividad del agua residual, las fugas y disolución del gas, el consumo por microorganismos metanogénicos y las limitaciones de transferencia electrónica en sistemas de mayor tamaño.

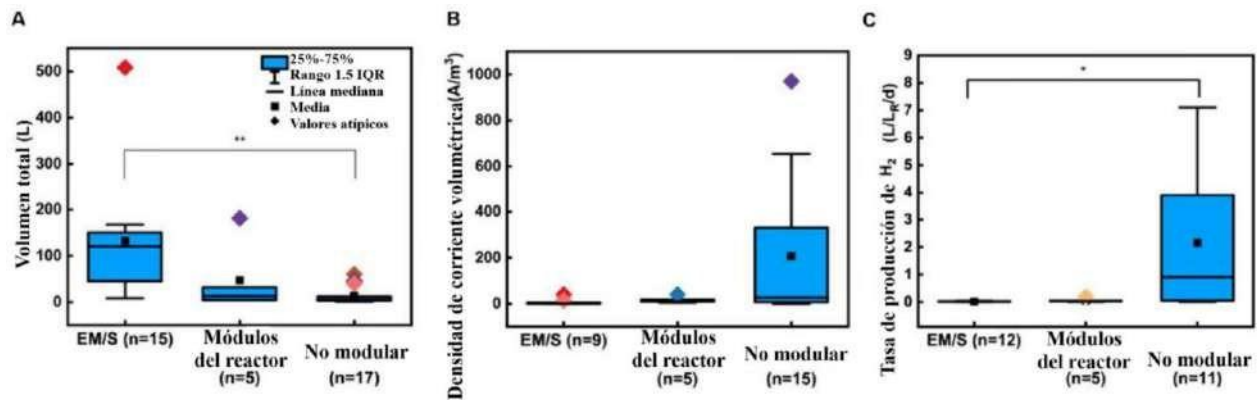
En cuanto al diseño, la modularización de electrodos con separación de cámaras ha demostrado ser una estrategia efectiva para alcanzar volúmenes superiores a 100 L y facilitar la recolección directa de hidrógeno, evitando su mezcla con gases del ánodo. No obstante, este enfoque incrementa la complejidad constructiva y los costos de fabricación.

Por el contrario, los reactores sin modularización tienden a lograr densidades de corriente más elevadas (promedio de $207 A * M^{-3}$), aunque su capacidad de operación se limita a volúmenes de hasta 60 L (Jiang et al., 2023). Las diferencias en rendimiento también dependen de

la configuración del sistema, tal como se evidencia en la Figura 6, donde se comparan MEC piloto con modularización de electrodos y sin modularización, mostrando el compromiso entre capacidad de operación y densidad de corriente.

Figura 6

Comparación de rendimiento de MEC piloto según configuración de reactor.



Nota. Diagramas de caja que comparan el volumen total (A), la densidad de corriente volumétrica (B) y la tasa de producción de H₂ (C) en reactores MEC piloto con diferentes configuraciones de escalado. Incluye módulos de electrodos con separación de cámaras (EM/S), módulos de reactor y sistemas sin modularización. Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas (*p ≤ 0,05, **p ≤ 0,01). Tomada de Scale-Up and Techno-Economic Analysis of Microbial Electrolysis Cells for Hydrogen Production from Wastewater, por J. Jiang, J. A. Lopez-Ruiz, Y. Bian, D. Sun, Y. Yan, X. Chen, J. Zhu, H. D. May y Z. J. Ren, 2023, Water Research, 234, 119932. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119932>.

La Figura 6 muestra que los sistemas sin modularización alcanzan densidades de corriente y tasas de producción de H₂ más elevadas, aunque su volumen operativo máximo es considerablemente menor. En contraste, los sistemas con modularización permiten escalar a mayores volúmenes, pero con una disminución significativa del rendimiento electroquímico, lo que refleja un compromiso entre capacidad de tratamiento y eficiencia de producción.

En síntesis, los resultados a escala piloto confirman el potencial de las MEC con biocátodos como tecnología para la producción simultánea de hidrógeno y el tratamiento de aguas residuales, pero también ponen de manifiesto que los retos de escalado, como la caída de densidad de corriente, la metanogénesis y el aumento de los costos de construcción, constituyen barreras críticas que deben ser superadas para su implementación industrial.

5.5. Análisis de los desafíos técnicos y oportunidades asociados con la implementación de esta tecnología.

La implementación de celdas de electrólisis microbiana (MEC) con biocátodos enfrenta múltiples desafíos técnicos que actualmente limitan su escalabilidad y operación continua en ambientes industriales. Sin embargo, también existen oportunidades claras que pueden ser aprovechadas mediante innovación en materiales, diseño de reactores y control de procesos.

Una MEC típica está compuesta por un ánodo y un biocátodo conectados a una fuente externa de energía. Este diseño permite que los microorganismos presentes en el ánodo oxiden la materia orgánica del agua residual, liberando electrones que, al ser conducidos hacia el biocátodo, facilitan la reducción de protones para la generación de hidrógeno (Fudge et al., 2021). A partir de esta configuración básica se han desarrollado diversas adaptaciones orientadas a mejorar la eficiencia y la estabilidad del sistema. No obstante, persisten barreras técnicas que condicionan su escalabilidad y viabilidad industrial. En este contexto, los principales desafíos técnicos para la implementación de MEC con biocátodos incluyen:

5.5.1. Baja densidad de corriente a gran escala

La baja densidad de corriente constituye uno de los principales retos para el escalado de las MEC con biocátodos, especialmente en comparación con las tecnologías de electrólisis

convencionales. En condiciones de laboratorio, se han alcanzado densidades de hasta ~ 50 A/m², con una distribución uniforme del biofilm y control preciso de las condiciones operativas (Logan et al., 2019).

Sin embargo, en sistemas piloto de mayor escala, como reactores de 10–100 L, la densidad de corriente suele reducirse drásticamente a valores inferiores a 1 A/m²; por ejemplo, se han reportado valores cercanos a 0,3 A/m² debido al aumento de resistencias internas, pérdidas ohmicas y heterogeneidad en la formación del biofilm (Kadier et al., 2016).

Este descenso en el rendimiento se asocia a varios factores: mayor distancia entre electrodos, incremento de las pérdidas por transporte de masa, aparición de zonas muertas hidráulicas y variaciones en la composición y actividad microbiana sobre la superficie del electrodo (Noori et al., 2024). La baja densidad de corriente no solo limita la tasa de producción de hidrógeno por unidad de área, sino que también incrementa el área total necesaria para alcanzar volúmenes de producción competitivos, lo que repercute directamente en el CAPEX del sistema (Villano et al., 2017).

Para superar esta limitación, se han propuesto estrategias como el rediseño geométrico de los electrodos para maximizar la superficie efectiva, el uso de materiales de alta conductividad con recubrimientos catalíticos, la optimización del flujo hidráulico para mejorar la distribución del sustrato y la aplicación de arreglos modulares que reduzcan la distancia de transporte de electrones (Zhang et al., 2020).

5.5.2. Estabilidad

La estabilidad del biocátodo constituye uno de los retos críticos en la implementación de MEC a gran escala, ya que el aumento de la resistividad interna durante el escalado compromete

la eficiencia del sistema (Noori et al., 2024). Este fenómeno se ve agravado por el manejo de biofilms sobre superficies extensas, donde el espesor y la heterogeneidad de la capa microbiana pueden dificultar la transferencia de electrones y la difusión de reactivos (Kadier et al., 2016).

Asimismo, el control del crecimiento microbiano no deseado, en especial de metanógenos que consumen el hidrógeno generado, es fundamental para evitar pérdidas de rendimiento y pureza del gas (Cheng et al., 2011).

La proliferación de estas bacterias compite directamente con la hidrogenogénesis, desviando el flujo de electrones hacia la producción de metano y reduciendo la eficiencia global del proceso (Villano et al., 2017). Para mitigar estos problemas, resulta esencial implementar estrategias de control de la comunidad microbiana, optimizar las condiciones operativas y desarrollar sistemas modulares que permitan mantener la homogeneidad hidráulica y eléctrica, mejorando la transferencia de masa y reduciendo la resistencia interna incluso en configuraciones de gran escala (Noori et al., 2024).

5.5.3. Coste de materiales

El coste de los electrodos de alta área específica continúa siendo uno de los factores limitantes más relevantes para la implementación a gran escala de MEC con biocátodos (Zhang et al., 2020). Estos electrodos, esenciales para maximizar la superficie de reacción y mejorar la transferencia de electrones, suelen fabricarse con materiales conductores y resistentes a la corrosión que incrementan significativamente el CAPEX del sistema (Kadier et al., 2016). En la práctica, las MEC aún enfrentan costos de capital elevados no solo por los electrodos, sino también por componentes asociados como separadores, colectores de corriente y sistemas de sellado (Noori et al., 2024).

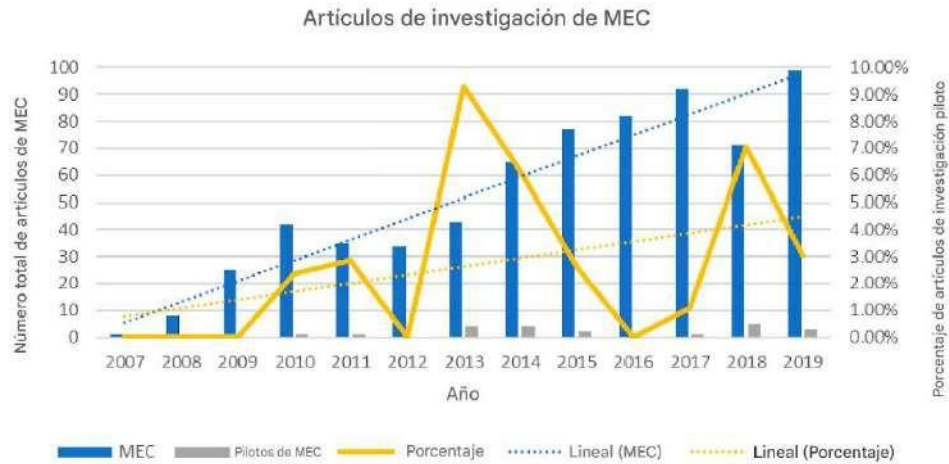
La viabilidad económica de esta tecnología se determina en gran medida por la capacidad de integrarla con otros procesos o tecnologías complementarias que incrementen la eficiencia global, especialmente en la eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales (Villano et al., 2017). En este sentido, se ha identificado que gran parte del valor económico potencial de una MEC puede provenir de los ahorros generados en el tratamiento de efluentes y en el cumplimiento de normativas ambientales, más que de la venta directa del hidrógeno producido (Cusick et al., 2011).

Por ello, las estrategias de escalado deben considerar no solo la optimización de la producción de H_2 , sino también la maximización de los beneficios asociados al tratamiento de aguas y la valorización de subproductos. Sin embargo, una barrera importante para la adopción de sistemas de tratamiento de aguas residuales con MEC es la falta de comprensión del rendimiento de los sistemas a gran escala.

Actualmente, existe un número muy limitado de estudios con volúmenes de 10–100 L y a escala piloto (> 100 L) reportados en la literatura, lo que dificulta validar la viabilidad técnica y económica en condiciones reales. Como se muestra en la Figura 7, se ha observado un aumento constante en la publicación de artículos que abordan el uso de MEC para el tratamiento de aguas residuales; no obstante, persiste una notable disparidad entre la investigación a escala de laboratorio y a escala piloto, lo que implica que gran parte de los problemas relacionados con el escalamiento y sus efectos son todavía desconocidos o extrapolados de forma limitada (Fudge et al., 2021).

Figura 7

Número de estudios que investigan el uso de MEC para el tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio (azul) y a escala piloto (amarillo). Datos obtenidos mediante búsqueda en Google Académico hasta 2019.



Nota: Tomada de Fudge, T., Bulmer, I., Bowman, K., Pathmakanthan, S., Gambier, W., Dehouche, Z., Al-Salem, S. M., & Constantinou, A. (2021). Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps. *Water*, 13(4), 445. <https://doi.org/10.3390/w13040445> (CC BY 4.0).

A pesar de sus desafíos, las MEC con biocátodos representan una oportunidad estratégica para producir hidrógeno de manera sostenible mientras se tratan efluentes, aprovechando la materia orgánica de aguas residuales como fuente de energía y transformando un pasivo ambiental en un producto valioso bajo un enfoque de economía circular (Jiang et al., 2023; Yang et al., 2020).

Sin embargo, una barrera importante para su adopción masiva es la limitada comprensión del rendimiento de los sistemas a gran escala, ya que la mayoría de los estudios se han desarrollado en condiciones de laboratorio. Como se muestra en la Figura 7, existe una marcada disparidad entre la investigación a escala de laboratorio y la realizada a escala piloto (Fudge et al., 2021). Esta brecha implica que los problemas asociados al escalado y sus efectos aún se desconocen en gran medida, y en muchos casos se han extrapolado sin validación experimental suficiente.

Las oportunidades de mejora se centran en el diseño modular de reactores para minimizar resistencias internas ,el uso de electrodos optimizados (espumas metálicas, recubrimientos nanométricos) para aumentar la densidad de corriente , la selección y control de consorcios microbianos que maximicen la producción de hidrógeno y minimicen la metanogénesis (Logan et al., 2019), y la integración de MEC con otros procesos como digestión anaerobia o electrólisis convencional para mejorar estabilidad y escalabilidad (Kadier et al., 2016).

5.6. Beneficios, limitaciones económicas, ambientales y sociales.

5.6.1. Económicos

Las MEC con biocátodos ofrecen ventajas significativas al reducir el consumo eléctrico por kilogramo de hidrógeno producido, gracias al aprovechamiento de la energía química contenida en los sustratos orgánicos, y al disminuir los costos asociados al tratamiento de aguas residuales. Este doble beneficio mejora su viabilidad en instalaciones con altos caudales de efluentes orgánicos, como plantas de tratamiento industrial o municipal (Villano et al., 2017). En escenarios óptimos, la integración del valor del tratamiento y la generación de H₂ podría reducir el costo nivelado de hidrógeno, acercándolo a niveles competitivos con tecnologías convencionales (Cusick et al., 2011).

No obstante, el CAPEX actual sigue siendo elevado e incierto, debido a la necesidad de electrodos de alta área específica fabricados con materiales especializados y a la gran superficie de instalación requerida para compensar la baja densidad de corriente a gran escala (Zhang et al., 2020). Además, los costes de operación y mantenimiento incluyen la sustitución periódica de electrodos, limpieza de biofilms y control de la comunidad microbiana, lo que incrementa el OPEX (Kadier et al., 2016). Las proyecciones económicas dependen fuertemente de la densidad de

corriente alcanzada, de la vida útil de los componentes y de la disponibilidad y estabilidad del suministro de sustrato (U.S. Department of Energy, 2024).

Estudios de análisis tecno-económico sugieren que, en muchos casos, el mayor valor económico de una MEC no proviene de la venta directa del hidrógeno, sino de los ahorros obtenidos por la reducción en el coste del tratamiento de efluentes y por el cumplimiento de normativas ambientales más estrictas (Cusick et al., 2011; Villano et al., 2017). Esto refuerza la idea de que la integración de la tecnología en instalaciones que ya requieren tratamiento de aguas es clave para su competitividad.

5.6.2. Ambientales

El principal beneficio ambiental de las MEC con biocátodos radica en su capacidad de reducir simultáneamente la carga de contaminantes orgánicos en aguas residuales y producir hidrógeno como vector energético limpio, lo que contribuye a disminuir la huella de carbono en comparación con los métodos convencionales de producción de H₂ (Cusick et al., 2011). Al aprovechar la materia orgánica como fuente parcial de energía, se reduce la dependencia de electricidad proveniente de fuentes fósiles, lo que mejora el balance de emisiones de gases de efecto invernadero (Villano et al., 2017).

Además, la integración de MEC en plantas de tratamiento de aguas puede eliminar hasta un 80–90% de la demanda química y biológica de oxígeno, evitando la liberación de efluentes con alta carga contaminante a cuerpos receptores (Kadier et al., 2016). Esta doble función permite que la tecnología actúe como un sistema de depuración avanzado con generación energética asociada, lo que refuerza su atractivo en el marco de políticas de economía circular y objetivos de sostenibilidad (Noori et al., 2024).

Sin embargo, existe el riesgo ambiental asociado a la proliferación de metanógenos en el biocátodo, que pueden consumir el hidrógeno producido y generar metano. Si este gas se libera sin capturarlo, su potencial de calentamiento global aproximadamente 28 veces mayor que el del CO₂ en un horizonte de 100 años podría anular gran parte de los beneficios climáticos del proceso (Logan et al., 2019). Este aspecto requiere un control riguroso de la comunidad microbiana y del sellado del sistema para evitar emisiones fugitivas (Cheng et al., 2011).

Por otro lado, el análisis de ciclo de vida (LCA) de las MEC indica que los beneficios ambientales netos dependen de factores como la durabilidad de los electrodos, el origen de la electricidad suplementaria y la gestión de residuos sólidos generados (Zhang et al., 2020). Esto significa que, para maximizar el impacto positivo, la tecnología debe optimizarse no solo en términos de eficiencia electroquímica, sino también en su diseño integral y en la logística de operación.

5.6.3. Sociales

Las MEC con biocátodos, cuando se integran en plantas de tratamiento de aguas residuales, pueden generar un impacto social positivo significativo al promover la creación de empleos técnicos especializados en operación, mantenimiento y monitoreo del sistema (Villano et al., 2017). Además, al producir hidrógeno en el mismo sitio donde se realiza el tratamiento, se incrementa la autosuficiencia energética local y se reduce la dependencia de fuentes externas, lo que fortalece la resiliencia de comunidades e instalaciones industriales (Noori et al., 2024).

La mejora de la calidad del agua tratada también puede aumentar la aceptación comunitaria, ya que la población percibe beneficios directos en la salud pública, el medio ambiente y la calidad de vida (Cusick et al., 2011). Asimismo, la implementación de esta tecnología en

contextos industriales puede contribuir a la responsabilidad social empresarial, alineando a las compañías con objetivos de sostenibilidad y políticas de economía circular (Kadier et al., 2016).

Sin embargo, para su adopción masiva es necesario superar limitaciones sociales y regulatorias. La operación segura de sistemas que producen y manejan hidrógeno requiere de personal capacitado, lo que implica programas de formación técnica continua (Logan et al., 2019). Además, la inversión inicial y los requisitos de cumplimiento de normativas internacionales de seguridad y calidad del gas pueden retrasar la aceptación e implementación de la tecnología (Zhang et al., 2020). También se debe considerar la percepción pública del hidrógeno como gas inflamable, que en algunos casos puede generar resistencia social si no se acompaña de campañas de información y educación adecuadas (Cheng et al., 2011).

6. Conclusiones

Se determina que las celdas electrolíticas con biocátodos representan una alternativa viable para la producción de hidrógeno verde en entornos industriales con aguas residuales orgánicas, al combinar el tratamiento de efluentes con la generación de energía. Esta dualidad permite optimizar recursos y mejorar la sostenibilidad del proceso, aunque se concluye que su implementación a gran escala requiere optimización de materiales, diseño de reactores y control operativo.

Se concluye que las MEC con biocátodos alcanzan menores consumos energéticos netos que las tecnologías de electrólisis alcalina y PEM, gracias al aprovechamiento de la energía química presente en los efluentes. Asimismo, se establece que aportan un valor adicional al realizar simultáneamente la depuración del agua tratada. Sin embargo, se determina que las tecnologías convencionales mantienen ventaja en madurez, densidad de corriente y pureza del hidrógeno, lo que las consolida como la opción dominante en producción a gran escala.

Se identifica que los principales retos para el escalado de esta tecnología son la baja densidad de corriente en sistemas piloto, la inestabilidad del biocátodo y los elevados costos de materiales especializados. Se deduce que las oportunidades de mejora radican en el diseño modular, el desarrollo de electrodos de alta área y bajo coste, la optimización de consorcios microbianos y la integración con otros procesos complementarios para potenciar el rendimiento y la estabilidad.

Se establece que, desde el punto de vista económico, las MEC con biocátodos pueden reducir los costos de tratamiento y el consumo eléctrico por unidad de hidrógeno, pero su competitividad depende de disminuir la inversión inicial y aumentar la productividad. Ambientalmente, se concluye que favorecen la reducción de la carga contaminante y la generación de energía limpia, aunque requieren medidas para minimizar pérdidas por metanogénesis. Socialmente, se determina que pueden generar empleo técnico, fomentar la autosuficiencia energética y mejorar la aceptación

comunitaria, siempre que se cuente con personal capacitado y el cumplimiento de las normativas de seguridad.

7. Referencias bibliográficas

- Battle-Vilanova, P., González, J. C., Puig, S., & Ortega, R. G. (2016). Bioelectrochemical transformation of carbon dioxide to target compounds through microbial electrosynthesis. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=116010>
- Becker, H., Murawski, J., Shinde, D. V., Stephens, I. E. L., Hinds, G., & Smith, G. (2023). Impact of impurities on water electrolysis: A review. *Sustainable Energy & Fuels*, 7(7), 1565–1603. <https://doi.org/10.1039/d2se01517j>
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes*, 8(2), 248. <https://doi.org/10.3390/pr8020248>
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2017). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
- Chen, P., & Hu, X. (2020). High-efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts. *Advanced Energy Materials*, 10(39), 2002285. <https://doi.org/10.1002/aenm.202002285>
- Chou, K. (2023). BioHydrogen (BioH₂) consortium to advance fermentative H₂ production. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/p17_9_chou_2023_o-pdf.pdf
- Cusick, R. D., Bryan, B., Parker, D. S., Merrill, M. D., Mehanna, M., Kiely, P. D., ... & Logan, B. E. (2011). Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89, 2053–2063. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3130-9>

- Electric Power Research Institute. (s. f.). EPRI home.
<https://www.epri.com/research/products/000000003002025148>
- European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.
https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf
- Fudge, T., Bulmer, I., Bowman, K., Pathmakanthan, S., Gambier, W., Dehouche, Z., Al-Salem, S. M., & Constantinou, A. (2021). Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps. *Water*, 13(4), 445.
<https://doi.org/10.3390/w13040445>
- González Sierra, N. D. (2019). Universidad Nacional de Colombia. (2019). Evaluación de la eficiencia en la producción de hidrógeno mediante celdas electrolíticas [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81589/80040879.2019.pdf?sequence=1>
- Guerrero-Sodric, O., Baeza, J. A., & Guisasola, A. (2024). Enhancing bioelectrochemical hydrogen production from industrial wastewater using Ni-foam cathodes in a microbial electrolysis cell pilot plant. *Water Research*, 256, 121616.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121616>
- Hua, T., Li, S., Li, F., Zhou, Q., & Stevy, O. B. (2018). Microbial electrolysis cell as an emerging versatile technology: A review on its potential application, advance and challenge. *Revista/Título, fecha de publicación julio 2018*.
- International Energy Agency. (2019). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

- Jiang, J., Lopez-Ruiz, J. A., Bian, Y., Sun, D., Yan, Y., Chen, X., Zhu, J., May, H. D., & Ren, Z. J. (2023). Scale-up and techno-economic analysis of microbial electrolysis cells for hydrogen production from wastewater. *Water Research*, 241, 120139. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120139>
- Kadier, A., Simayi, Y., Abdeshahian, P., Azman, N. F., Cheng, C. K., & Wu, T. Y. (2016). A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 406–430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.050>
- Kim, J. H., Jo, H. J., Han, S. M., Kim, Y. J., & Kim, S. Y. (2025). Recent advances in electrocatalysts for anion exchange membrane water electrolysis: Design strategies and characterization approaches. *Energy Materials*, 5(8), 1050–1075. <https://doi.org/10.20517/energymater.2024.290>
- Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2019). Microbial fuel cells: Challenges and applications. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5172–5180. <https://doi.org/10.1021/es0627592>
- Lopez, V. M., Ziar, H., Haverkort, J., Zeman, M., & Isabella, O. (2023). Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113407>

- Luo, X., Kushner, D. I., & Kusoglu, A. (2023b). Anion exchange membranes: The effect of reinforcement in water and electrolyte. *Journal of Membrane Science*, 685, 121945. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121945>
- Mallapragada, D., & Rubin, J. (2022, 1 de septiembre). Techno-economic assessment of electrolytic hydrogen production under dynamic operations. <https://hdl.handle.net/1721.1/148613>
- Nasser, M., Megahed, T. F., Ookawara, S., & Hassan, H. (2022). A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(58), 86994–87018. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y>
- Noori, M. T., Rossi, R., Logan, B. E., & Min, B. (2024). Hydrogen production in microbial electrolysis cells with biocathodes. *Trends in Biotechnology*, 42(7).
- Radhika, D., Shivakumar, A., Kasai, D. R., Koutavarapu, R., & Peera, S. G. (2022). Microbial electrolysis cell as a diverse technology: Overview of prospective applications, advancements, and challenges. *Energies*, 15(7), 2611. <https://doi.org/10.3390/en15072611>
- Ren, Z., Ruiz, J. L., Zhang, Y., Li, S., & Maravelias, C. (2024). Synergistic thermo-microbial-electrochemical (T-MEC) approach for drop-in fuel production from wet waste. <https://doi.org/10.2172/2515686>
- Rozenfeld, S., Cahan, R., Teler, H., & Schechter, A. (2017). A microbial electrolysis cell for bio-hydrogen production and wastewater bioremediation. *Proceedings of the World Congress on New Technologies*. <https://doi.org/10.11159/icert17.104>

- Sharma, P., Singh, R., & Mehta, A. (2024). Gas purity challenges in microbial electrolysis cells. *Renewable Energy*, 223, 120060. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.120060>
- Son, S., Koo, B., Chai, H., Tran, H. V. H., Pandit, S., & Jung, S. P. (2020). Comparison of hydrogen production and system performance in a microbial electrolysis cell containing cathodes made of non-platinum catalysts and binders. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101844. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101844>
- Tang, J., Li, C., & Zhao, H. (2022). Nanostructured cathode materials for microbial electrolysis cells. *Applied Catalysis B: Environmental*, 313, 121489. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121489>
- U.S. Department of Energy. (s. f.). Technical targets for liquid alkaline electrolysis. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-liquid-alkaline-electrolysis#:~:text=Stack%20Performance%20%C2%A0%200.5%20A%2Fcm,e%7D%20mV%2Fkh>
- Villano, M., Monaco, G., Aulenta, F., & Majone, M. (2017). Electrochemically assisted hydrogen production with microbial electrolysis cells: A review. *Chemical Engineering Journal*, 328, 890–903. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.154>
- Wang, C., & Feng, L. (2023). Recent advances and perspectives of Ir-based anode catalysts in PEM water electrolysis. *Energy Advances*, 3(1), 14–29. <https://doi.org/10.1039/d3ya00492a>
- Wang, L., Linowski, K., & Liu, H. (2022). Scalable membrane-less microbial electrolysis cell with multiple compact electrode assemblies for high performance hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140257. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140257>

Yang, F., Li, X., & Xu, H. (2020). Pilot-scale study of microbial electrolysis cells for wastewater treatment and hydrogen production. *Water Research*, 178, 115819.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115819>

Zhang, Y., Liu, H., & Cheng, S. (2020). Materials and designs for microbial electrolysis cells: Current status and future perspectives. *Journal of Power Sources*, 450, 227636.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227636>

8. Anexos.

Apéndice A

Análisis de las redes bibliométricas.

| Datos Generales | | | | | | | | | | | | Filtros | | | | |
|-----------------|---|---|------|---|---|--|---|--|--|---|---|---|----|--|--------------------|--|
| | | | | | | | | | | | | Primer Filtro (-12) | | Segundo Filtro (-2) | Tercer Filtro (-1) | |
| Numeración | Referencias en APA | Autores | Año | Título | Fuente | Metodología | Enlace | Tema / Tecnología | Objetivos principales | Resumen del artículo | Palabras clave | Algunos no abordan la producción de hidrógeno, otros no consideran la viabilidad de celdas electrolíticas en dicho proceso o simplemente tratan el uso de aguas residuales de manera general, sin incluir análisis experimentales | | Publicaciones fuera del periodo de estudio establecido (2010-2025) | Por título | Relación con los objetivos específicos |
| 1 | ACS Sustainable Chemistry & Engineering Editorial Team (2023). Microbial water electrolysis cells for efficient wastewater treatment and H ₂ production. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. https://doi.org/10.1021/acscchemeng.3c07993 | ACS Sustainable Chemistry & Engineering Editorial Team | 2023 | Microbial water electrolysis cells for efficient wastewater treatment and H ₂ production | Microbial water electrolysis cells for efficient wastewater treatment and H ₂ production | Artículo editorial/overview basado en literatura reciente. | https://doi.org/10.1021/acscchemeng.3c07993 | Celdas de electrolisis microbiana (MEC), tratamiento de aguas residuales; H ₂ . | Contextualizar avances y oportunidades de las MEC en tratamiento y producción de hidrógeno. | Síntesis del estado del arte y retos de escalado y eficiencia de MEC en aplicaciones ambientales. | MEC; aguas residuales; hidrógeno; estado del arte | SI | NO | NO | NO | |
| 2 | Akyüz, E. S. (2024). Hydrogen generation electrolyzers: Paving the way for large-scale deployment. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113407 | Akyüz, E. S. | 2024 | Hydrogen generation electrolyzers: Paving the way for large-scale deployment | Hydrogen generation electrolyzers: Paving the way for large-scale deployment | Revisión crítica de tecnologías de electrolisis. | https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113407 | PEM, alcalina, AEM, escalado industrial. | Identificar barreras y habilitadores para el despliegue masivo de electrolizadores. | Análisis de eficiencia, costos, materiales críticos y estrategias de integración con renovables. | electrolizadores; escalado; PEM, AEM; AEM; costos | SI | NO | NO | NO | |
| 3 | Arsad, S. R. (2024). Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A bibliometric review. International Journal of Hydrogen Energy. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.045 | Arsad, S. R. | 2024 | Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A bibliometric review | Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A bibliometric review | Revisión bibliométrica (análisis de publicaciones, citas, tendencias). | https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.045 | Electrolisis de agua; análisis bibliométrico. | Mapear tendencias, actores y temas emergentes en electrolisis de agua. | Caracteriza evolución de la investigación y áreas con mayor impacto e innovación. | bibliométrico; electrolisis; tendencias; H ₂ hidrogeno | SI | NO | NO | NO | |
| 4 | Ayubrad, M., Alkbar, M., & Ousareh, H. R. (2023). Modeling and constraint-aware control of pressure dynamics in water electrolysis systems. <i>arXiv</i> https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.16935 | Ayubrad, M., Alkbar, M., Ousareh, H. R. | 2023 | Modeling and constraint-aware control of pressure dynamics in water electrolysis systems | Modeling and constraint-aware control of pressure dynamics in water electrolysis systems | Modelado dinámico y diseño de control con restricciones. | https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.16935 | Dinámica de presión; control; electrolizadores. | Desarrollar estrategias de control que garanticen operación segura bajo restricciones. | Propone modelos y controladores para gestionar transitorios de presión y mejorar estabilidad. | modelado; control; presión; seguridad operativa | NO | NO | NO | NO | |
| 5 | Balle-Villanova, P., Puig, S., Gonzalez-Olmos, R., Balaguer, M. D., & Colprim, J. (2016). Continuous acetate production through microbial electrosynthesis from CO ₂ with microbial mixed culture. <i>Journal of Chemical Technology and Biotechnology</i> 87(8), 1131-1136. https://doi.org/10.1002/jctb.4365 | Balle-Villanova, P., Puig, S., Gonzalez-Olmos, R., Balaguer, M. D., Colprim, J. | 2016 | Continuous acetate production through microbial electrosynthesis from CO ₂ with microbial mixed culture | Continuous acetate production through microbial electrosynthesis from CO ₂ with microbial mixed culture | Experimentos de electrosíntesis microbiana en flujo continuo. | https://doi.org/10.1002/jctb.4365 | Electrosíntesis microbiana; producción de acetato; CO ₂ ; a química. | demostrar producción continua de acetato desde CO ₂ con cultivos mixtos. | Evalúa rendimiento y condiciones operativas para maximizar conversión productiva. | electrosíntesis; acetato; CO ₂ ; cultivos mixtos | SI | SI | SI | SI | |
| 6 | Bayat, A. (2023). Proton exchange membrane electrolysis revisited: Components, configurations and efficiency improvements. <i>Energies</i> 16(4), 72. https://doi.org/10.3390/en16040072 | Bayat, A. | 2023 | Proton exchange membrane electrolysis revisited: Components, configurations and efficiency improvements | Proton exchange membrane electrolysis revisited: Components, configurations and efficiency improvements | Revisión técnica de componentes y configuraciones PEM. | https://doi.org/10.3390/en16040072 | PEM water electrolysis; eficiencia; diseño de celdas. | Revisar mejoras de eficiencia y materiales en electrolizadores PEM. | Discute membranas, electrodos, catalizadores y estrategias operativas para mayor rendimiento. | PEM; eficiencia; componentes; catalizadores. | SI | NO | NO | NO | |
| 7 | Becker, H., Murawski, J., Shinde, D. V., Stephens, I. E. L., Hinds, G., & Smith, G. (2013). Impact of impurities on water electrolysis: A review. <i>Sustainable Energy & Fuels</i> , 7(7), 1560-1603. https://doi.org/10.1039/c2su01517f | Becker, H., Murawski, J., Shinde, D. V., Stephens, I. E. L., Hinds, G., Smith, G. | 2013 | Impact of impurities on water electrolysis: A review | Impact of impurities on water electrolysis: A review | Revisión sobre impurezas y degradación. | https://doi.org/10.1039/c2su01517f | Efecto de impurezas; durabilidad; AEM/PEM/ADM. | Completar efectos de contaminantes en rendimiento y vida útil de electrolizadores. | Resume mecanismos de envenenamiento, mitigación y requisitos de calidad del agua. | impurezas; degradación; pureza de agua; durabilidad | SI | SI | SI | SI | |
| 8 | Bhagat, M. S. (2025). Zero-discharge, self-sustained 3D-printed microbial electrochemical systems integrating MFC-ECC-MEC-PRR for hydrogen and CO ₂ valorisation. <i>Chemical Communications</i> Advance online publication. https://doi.org/10.1039/D5CC01031J | Bhagat, M. S. | 2025 | Zero-discharge, self-sustained 3D printed microbial electrochemical systems integrating MFC-ECC-MEC-PRR for hydrogen and CO ₂ valorisation | Zero-discharge, self-sustained 3D printed microbial electrochemical systems integrating MFC-ECC-MEC-PRR for hydrogen and CO ₂ valorisation | Diseño experimental y validación de sistema integrado impreso en 3D. | https://doi.org/10.1039/D5CC01031J | Sistemas bioelectroquímicos integrados; MFC/ECC/MEC/PRR. | demostrar una plataforma autosuficiente sin descarga para H ₂ y valorización de CO ₂ . | Integra módulos bioelectroquímicos y fotobiorreactor para cerrar ciclos de materia y energía. | MEC; MFC; impresión 3D; PRR; cero-descarga | SI | NO | NO | NO | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|--|------|---|---|---|---|---|---|--|---|----|----|----|
| 9 | Bonanno, M., Müller, K., Bessmann, B., Hanke-Rauschenbach, R., All, D., Franken, T., Chromik, A., Pasch, R., Freilberg, A. T. S., & Thiele, S. (2024). Review and Prospects of PEM Water Electrolysis at Elevated Temperature Operation. <i>Advanced Materials Technologies</i> , 9(2), Article 2302281. https://doi.org/10.1002/admt.202302081 | Bonanno, M., Müller, K., Bessmann, B., Hanke-Rauschenbach, R., All, D., et al. | 2024 | Review and Prospects of PEM Water Electrolysis at Elevated Temperature Operation | Review and Prospects of PEM Water Electrolysis at Elevated Temperature Operation | Revisión enfocada en operación a alta temperatura. | https://doi.org/10.1002/admt.202302081 | PEM/H; estabilidad de materiales; cinética mejorada. | Analizar beneficios, desafíos y materiales para PEM a temperaturas elevadas. | Discute conductividad, durabilidad y configuraciones para mejorar eficiencia térmica. | PEM; alta temperatura; materiales; durabilidad | NO | NO | NO |
| 10 | Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. <i>Processes</i> , 8(2), 248. https://doi.org/10.3390/pr8020248 | Brauns, J., Turek, T. | 2020 | Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review | Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review | Revisión de AEL acoplada a renovables. | https://doi.org/10.3390/pr8020248 | AEL; integración con renovables; operación dinámica. | Revisar estado del arte y retos de AEL bajo potencia variable. | Cubre configuraciones, eficiencia, y estrategias para responder a intermitencia. | AEL; renovables; operación dinámica; eficiencia | SI | SI | SI |
| 11 | Buñón Méndez, G., & Carvajal Monroy, C. (2009). Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales. <i>Revista</i> , 10(6). | Buñón Méndez, G.; Carvajal Monroy, C. | 2009 | Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales | Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales | Revisión/estudio de caso sobre producción de H ₂ desde aguas residuales. | http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art50/art50.pdf | MEC/MFC; tratamiento de aguas; bihidrógeno. | Explorar rutas biotecnológicas para producir H ₂ aprovechando residuos líquidos. | Presenta bases, rendimientos y consideraciones prácticas en contextos latinoamericanos. | bihidrógeno; aguas residuales; MEC; MFC | NO | NO | NO |
| 12 | Buttler, A., & Spliethoff, H. (2017). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 82, 2440-2454. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003 | Buttler, A.; Spliethoff, H. | 2017 | Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review | Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review | Revisión integral de P2G/P2L y electrólisis. | https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003 | Electrolisis; almacenamiento; acoplamiento sectorial. | Evaluar el rol de la electrolisis en redes y acoplamiento sectorial. | Analiza aplicaciones, eficiencia económica del hidrógeno para balance de red. | power-to-gas; power-to-liquids; redes; almacenamiento | SI | SI | SI |
| 13 | Call, D., Logan, B. E. (2009). Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane. <i>Environmental Science & Technology</i> , 43(9), 3401-3406. https://doi.org/10.1021/es800382z | Call, D., Logan, B. E. | 2009 | Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane | Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane | Experimentos con MEC de cámara única sin membrana. | https://doi.org/10.1021/es800382z | MEC sin membrana; diseño de reactor. | Evaluar producción de H ₂ y desempeño de MEC simplificada. | Muestra viabilidad de MEC sin membrana con configuraciones y operación. | MEC; cámara única; hidrógeno; diseño | NO | NO | NO |
| 14 | Chen, F., & Hu, X. (2020). High efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts. <i>Advanced Energy Materials</i> , 10(39), 2002285. https://doi.org/10.1002/aem.202002285 | Chen, F.; Hu, X. | 2020 | High efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts | High efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts | Estudio experimental de AEMWE con catalizadores económicos. | https://doi.org/10.1002/aem.202002285 | AEM water electrolysis; catalizadores no nobles. | Demstrar alto rendimiento de AEMWE con materiales de bajo costo. | Optimiza electrocatalizadores y condiciones para mejorar eficiencia en AEM. | AEM; electrocatalizadores; eficiencia; bajo costo | SI | SI | SI |
| 15 | Chen, Y., Xu, Y., & Chen, L. (2015). Microbial electrolysis cells with polyimide/multi-walled carbon nanotube-modified biocathode. In A. Kader (Ed.), <i>Bioelectrosynthesis</i> (pp. 95-118). Wiley. https://doi.org/10.1002/978111934829.ch4 | Chen, Y.; Xu, Y.; Chen, L. | 2015 | Microbial electrolysis cells with polyimide/multi-walled carbon nanotube-modified biocathode | Microbial electrolysis cells with polyimide/multi-walled carbon nanotube-modified biocathode | Capítulo técnico con experimentos y revisión de biocátodos modificados. | https://doi.org/10.1002/978111934829.ch4 | Biocátodos MEC; polianilina; CNT. | Explorar mejoras de biocátodos para aumentar producción de H ₂ . | Describe síntesis, caracterización y desempeño de biocátodos PANI/CNT. | MEC; biocátodo; polianilina; nanotubos de carbono | NO | NO | NO |
| 16 | Cheng, S., Xing, D., Call, D. F., & Logan, B. E. (2011). Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis. <i>Environmental Science & Technology</i> , 45(10), 8953-8958. https://doi.org/10.1021/es103531g | Cheng, S.; Xing, D.; Call, D. F.; Logan, B. E. | sl. | Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis | Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis | Experimentos de electrometanogénesis en células bioelectroquímicas. | https://doi.org/10.1021/es103531g | Electrometanogénesis; conversión bioelectroquímica. | Demstrar producción de metano a partir de corriente eléctrica. | Prueba microorganismos metanogénicos en circuitos para convertir electrones en CH ₄ . | electrometanogénesis; metano; bioelectroquímica | NO | NO | NO |
| 17 | Chou, H. (2023). Techno-economic assessment of microbial electrolysis cells for hydrogen production. <i>Renewable Energy</i> , 208, 455-465. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.103 | Chou, H. | 2023 | Techno-economic assessment of microbial electrolysis cells for hydrogen production | Techno-economic assessment of microbial electrolysis cells for hydrogen production | Evaluación techno-económica basada en modelos y datos de literatura. | https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.103 | MEC; análisis TEA; producción de H ₂ . | Cuantificar costos, eficiencia y escalabilidad de MEC para H ₂ . | Modela CAPEX/OPEX y sensibilidad a parámetros clave de operación y escala. | TEA; MEC; escalado | SI | SI | SI |
| 18 | Chou, K. (2023). Biohydrogen (BioH ₂) consortium to advance fermentative H ₂ production. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogrambarrieres/pdf/review2/p179_chou_2023_0.pdf | Chou, K. | 2023 | Biohydrogen (BioH ₂) consortium to advance fermentative H ₂ production | Biohydrogen (BioH ₂) consortium to advance fermentative H ₂ production | Reporte técnico de consorcio; síntesis de proyectos. | https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogrambarrieres/pdf/review2/p179_chou_2023_0.pdf | Biohidrógeno fermentativo; H ₂ catalítica. | Describir metas y avances del consorcio BioH ₂ . | Resume líneas de trabajo en producción fermentativa y rutas integradas a MEC. | biohidrógeno; fermentación; consorcio; DOE | NO | NO | NO |
| 19 | Cusick, R. D., Bryan, B., Parker, D. S., Merrill, M. D., Mehana, M., Kieley, P. D., ... & Logan, B. E. (2011). Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater. <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i> , 85, 2053-2063. https://doi.org/10.1007/s00253-011-3130-9 | Cusick, R. D., Bryan, B., Parker, D. S., Merrill, M. D., Mehana, M., Kieley, P. D., ... Logan, B. E. | 2011 | Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater | Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater | Planta piloto de flujo continuo con aguas residuales vinícolas. | https://doi.org/10.1007/s00253-011-3130-9 | MEC piloto; tratamiento de aguas; H ₂ . | Evaluar desempeño pilot de MEC a escala piloto con efluente real. | Reporta tasas de H ₂ , remoción de DQO y eficiencia energética en condiciones operativas. | MEC; piloto; aguas residuales; vinícola | SI | SI | SI |
| 20 | Delo, E. (2023). Evaluation of complex multi-physics phenomena in PEM and alkaline electrolysis systems under dynamic gas conditions. <i>Scientific Reports</i> . Advance online publication. https://doi.org/10.1038/s41598-025-02316-5 | Delo, E. | 2025 | Evaluation of complex multi-physics phenomena in PEM and alkaline electrolysis systems under dynamic gas conditions | Evaluation of complex multi-physics phenomena in PEM and alkaline electrolysis systems under dynamic gas conditions | Simulación multi-física; validación experimental limitada. | https://doi.org/10.1038/s41598-025-02316-5 | PEM/AEL; dinámica de gases; fenómenos acoplados. | Caracterizar efectos dinámicos de gases en desempeño y seguridad. | Integra modelos de transporte, reacciones y flujo para explicar pérdidas y transitorios. | multi-física; dinámica de gas; PEM; AEL | NO | NO | NO |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|------|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|
| 21 | Dong, X. T., Pang, D. Y., Luo, G., & Zhu, X. F. (2024). Microbial water electrolysis cells for efficient wastewater treatment and hydrogen production. <i>ACS Sustainable Chemistry & Engineering</i> , 12(9), 4220–4232. https://doi.org/10.1021/acscchemeng.3c07953 | Dong, X. T.; Pang, D. Y.; Luo, G.; Zhu, X. F. | 2024 | Microbial water electrolysis cells for efficient wastewater treatment and hydrogen production | Microbial water electrolysis cells for efficient wastewater treatment and hydrogen production | Revisión técnica de MEC para tratamiento y H ₂ | https://doi.org/10.1021/acscchemeng.3c07953 | MEC, tratamiento de aguas, bihidrógeno | Evaluar avances limitantes y perspectivas de MEC en tratamiento de efluentes. | Compa configuraciones, materiales de electrodos y desempeño en distintas matrices. | MEC, tratamiento; hidrógeno; revisión | | | |
| 22 | Electric Power Research Institute. (s. f.). EPRI home. https://www.epri.com/research/products/00000000302025148 | Electric Power Research Institute (EPRI) | s.f. | EPRI home | EPRI home | Portal informativo de programas y productos. | https://www.epri.com/research/products/00000000302025148 | I+D eléctrica; hidrógeno; tecnologías green | Proveer acceso a productos de investigación y referencias técnicas. | Página de aterrizaje para búsqueda de informes y proyectos relevantes. | EPRI; investigador; energía; hidrógeno | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|--|------|---|---|---|---|--|---|---|---|--|--|--|
| 23 | Endrédi, B. (2025). Challenges and opportunities of dynamic operation in PEM electrolyzers: A techno-economic case of PV-coupled 1 MW PEM system. <i>Energies</i> , 18(8), 2154. https://doi.org/10.3390/en18092154 | Endrédi, B. | 2025 | Challenges and opportunities of dynamic operation in PEM electrolyzers: A techno-economic case of PV-coupled 1 MW PEM system | Challenges and opportunities of dynamic operation in PEM electrolyzers: A techno-economic case of PV-coupled 1 MW PEM system | Modelado tecneco-nómico de sistema PEM acoplado a PV. | https://doi.org/10.3390/en18092154 | PEM; operación dinámica; fotovoltaica. | Cuantificar impactos de operación dinámica costo y eficiencia. | Analiza perfiles de potencia intermitente y estrategias de control para reducir LCOH. | PEM; PV; LCOH; operación dinámica | | | |
| 24 | Euntee Yang, H., Hend Omar, M., Sung-Gwan Park, S., et al. (2021). A review on self-sustainable microbial electrolysis cells for electro-biohydrogen production via coupling with carbon-neutral renewable energy technologies. <i>Bioresource Technology</i> . https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124363 | Yang, H. E.; Omar, M. H.; Park, S. G.; et al. | 2021 | A review on self-sustainable microbial electrolysis cells for electro-biohydrogen production via coupling with carbon-neutral renewable energy technologies | A review on self-sustainable microbial electrolysis cells for electro-biohydrogen production via coupling with carbon-neutral renewable energy technologies | Revisión sobre integración MEC con renovables. | https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124363 | MEC, auto-sostenible; integración energética. | Evaluar esquemas de acoplamiento de MEC con tecnologías neutras en carbono. | Discute energías, almacenamiento y control para operación autosuficiente. | MEC, auto-sostenible; renovables; biot Hidrógeno | | | |
| 25 | European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf | European Commission | 2020 | A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe | A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe | Documento de política pública y hoja de ruta. | https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020/07/hydrogen_strategy_0.pdf | Estrategia de hidrógeno, UE. | Definir plan europeo para escalado de hidrógeno limpio. | Establece metas, inversiones y marcos regulatorios para 2020-2050. | política; UE; hidrógeno; estrategia | | | |
| 26 | Fudge, T., Bülmer, I., Bowman, K., Pathmakumaran, S., Gambier, W., Dehnbuch, Z., Al-Saleh, S. M., & Constantino, A. (2021). Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps. <i>Water</i> , 13(4), 445. https://doi.org/10.3390/w13040445 | Fudge, T.; Bülmer, I.; Bowman, K.; et al. | 2021 | Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps | Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps | Revisión con perspectivas de implementación descentralizada. | https://doi.org/10.3390/w13040445 | MEC, descentralizada; tratamiento y H ₂ . | Proponer pasos para llevar MEC del laboratorio al campo. | Identifica cuellos de botella técnicos y socioeconómicos para adopción. | MEC, descentralizado; implementación; tratamiento | | | |
| 27 | Fuku, X. (2025). Microbial fuel cells and microbial electrolysis cells for wastewater: Green energy source and cost-effective treatment. <i>Clean Technologies</i> , 1(1), 3. https://doi.org/10.3390/cleantech1010003 | Fuku, X. | 2025 | Microbial fuel cells and microbial electrolysis cells for wastewater: Green energy source and cost-effective treatment | Microbial fuel cells and microbial electrolysis cells for wastewater: Green energy source and cost-effective treatment | Revisión comparativa MEC vs MEC en aguas residuales. | https://doi.org/10.3390/cleantech1010003 | MFC, MEC, tratamiento; energía verde. | Comparar desempeño energético y de tratamiento en MFC/MEC. | Evalúa eficiencias, costos y aplicaciones para distintas matrices de efluentes. | MFC, MEC; aguas residuales; costos | | | |
| 28 | Guerrero-Sodric, O., Baeza, J. A., & Gutsasola, A. (2024). Enhancing bioelectrochemical hydrogen production from industrial wastewater using Ni foam cathodes in a microbial electrolysis cell pilot plant. <i>Water Research</i> , 256, 121616. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121616 | Guerrero-Sodric, O.; Baeza, J. A.; Gutsasola, A. | 2024 | Enhancing bioelectrochemical hydrogen production from industrial wastewater using Ni foam cathodes in a microbial electrolysis cell pilot plant | Enhancing bioelectrochemical hydrogen production from industrial wastewater using Ni foam cathodes in a microbial electrolysis cell pilot plant | Piloto MEC con cátodos de espuma de Ni; pruebas en efluente industrial. | https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121616 | MEC, cátodo Ni-foam; aguas industriales. | Mejorar producción de H ₂ en planta piloto mediante materiales de cátodo. | Reporta incrementos de tasa y eficiencia usando espuma de Ni en condiciones reales. | MEC; Ni-foam; piloto; hidrógeno | | | |
| 29 | Heidrich, E. S., Doffing, J., Scott, K., Edwards, S. R., Jones, C., & Curtis, T. P. (2013). Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales domésticas en una celda de electrolisis microbiana a escala piloto. <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i> , 97(16), 6979–6989. https://doi.org/10.1007/s00253-012-4466-7 | Heidrich, E. S.; Doffing, J.; Scott, K.; et al. | 2013 | Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales domésticas en una celda de electrolisis microbiana a escala piloto | Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales domésticas en una celda de electrolisis microbiana a escala piloto | Planta piloto MEC con aguas residuales domésticas. | https://doi.org/10.1007/s00253-012-4466-7 | MEC, piloto; tratamiento doméstico H ₂ . | Validar producción de H ₂ y remoción de carga orgánica a escala piloto. | Demuestra factibilidad y eficiencias bajo operación continua con efluente real. | MEC, piloto; doméstico; hidrógeno | | | |
| 30 | Horri, B. A. (2024). Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and future perspectives. <i>Science Progress</i> . Recuperado de https://doi.org/10.34133/research.0677 | Horri, B. A. | 2024 | Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and future perspectives | Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and future perspectives | Revisión del estado del arte. | https://doi.org/10.34133/research.0677 | Electrolisis; hidrógeno verde; perspectivas. | Sintetizar avances y retos en producción de H ₂ verde por electrolisis. | Cubre tecnologías AEL/PEM/ABA, costos y sostenibilidad. | hidrógeno; revisión; electrolisis; revisión | | | |
| 31 | Hu, H. (2009, 9 de diciembre). Enhancing hydrogen production in microbial electrolysis cells through development of platinum-free cathode and improvement of reactor design. http://hdl.handle.net/1957/13995 | Hu, H. | 2009 | Enhancing hydrogen production in microbial electrolysis cells through development of platinum-free cathode and improvement of reactor design | Enhancing hydrogen production in microbial electrolysis cells through development of platinum-free cathode and improvement of reactor design | Investigación experimental de cátodos sin Pt y diseño de reactor. | http://hdl.handle.net/1957/13995 | MEC, cátodos económicos; diseño. | Aumentar producción de H ₂ sin catalizadores platinos y optimizando reactor. | Prueba materiales alternativos y configuraciones para mejorar eficiencia. | MEC, cátodo; sin platino; diseño de reactor | | | |
| 32 | Hua, T., Li, S., Li, F., Zhou, Q., & Stey, O. B. (2018). Microbial electrolysis cell as an emerging versatile technology: A review on its potential application, advance and challenge. <i>fecha de publicación</i> 2018. | Hua, T.; Li, S.; Li, F.; Zhou, Q.; Stey, O. B. | 2018 | Microbial electrolysis cell as an emerging versatile technology: A review on its potential application, advance and challenge | Microbial electrolysis cell as an emerging versatile technology: A review on its potential application, advance and challenge | Revisión general de MEC y aplicaciones. | https://doi.org/10.1002/ymb.5888 | MEC; aplicaciones; desafíos. | Revisar potencial, avances y retos de MEC en múltiples sectores. | Presenta panorama de usos, desempeño y barreras técnicas. | MEC; revisión; aplicaciones; desafíos | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|---|------|--|--|---|---|---|--|---|--|----|----|----|
| 33 | Hussein, M. (2025). Rational design of cylindrical microbial electrolysis cells for high-strength wastewater treatment and scalable hydrogen production. <i>Chemical Engineering Journal</i> . https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159883 | Hussein, M. | 2025 | Rational design of cylindrical microbial electrolysis cells for high-strength wastewater treatment and scalable hydrogen production | Rational design of cylindrical microbial electrolysis cells for high-strength wastewater treatment and scalable hydrogen production | Diseño y pruebas experimentales de MEC cilíndricas. | https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159883 | MEC cilíndricas; aguas de alta carga. | Optimizar geometría para mejorar transferencia y escalabilidad. | Demuestra mayor rendimiento en efluentes concentrados con diseño racional. | MEC; diseño cilíndrico; escalado; alta carga | SI | NO | NO |
| 34 | International Energy Agency (2023). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen | International Energy Agency (IEA) | 2019 | The future of hydrogen: Seizing today's opportunities | The future of hydrogen: Seizing today's opportunities | Informe analítico con escenarios y políticas. | https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen | Economía del hidrógeno; políticas; tecnología. | Identificar oportunidades investigadas para el hidrógeno a nivel global. | Analiza cadenas de valor, costos y casos de uso prioritarios. | IEA; hidrógeno; economía; política | SI | SI | SI |
| 35 | Jiang, J., Lopez-Ruiz, J. A., Bian, Y., Sun, D., Yan, Y., Chen, X., Zhu, J., May, H. D., & Ren, Z. J. (2023). Scale-up and techno-economic analysis of microbial electrolysis cells for hydrogen production from wastewater. <i>Water Research</i> , 241, 120139. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120139 | Jiang, J.; Lopez-Ruiz, J. A.; Bian, Y.; et al. | 2023 | Scale-up and techno-economic analysis of microbial electrolysis cells for hydrogen production from wastewater | Scale-up and techno-economic analysis of microbial electrolysis cells for hydrogen production from wastewater | Escalamiento experimental y análisis técnico-económico. | https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120139 | MEC; escalado; TEA; aguas residuales. | Evaluar costos y rendimiento al escalar MEC para efluentes. | Integra datos de laboratorio/piloto con modelos económicos para LCOH. | MEC; escalado; TEA; aguas residuales | SI | SI | SI |
| 36 | Kader, A., Simay, Y., Abdehshian, P., Azman, N. F., Cheng, C. K., & Wu, T. Y. (2016). A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor design and configurations for sustainable hydrogen gas production. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 59, 400-420. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.050 | Kader, A.; Simay, Y.; Abdehshian, P.; et al. | 2016 | A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor design and configurations for sustainable hydrogen gas production | A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor design and configurations for sustainable hydrogen gas production | Revisión de diseños y configuraciones de MEC. | https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.050 | MEC; diseño de reactor; producción sostenible de H ₂ . | Comparar configuraciones y su impacto en rendimiento. | Resume arquitecturas, materiales y parámetros operativos clave. | MEC; diseño; configuraciones; hidrógeno | SI | SI | SI |
| 37 | Kim, J. H., Jo, H. J., Han, S. M., Kim, Y. J., & Kim, S. Y. (2025). Recent advances in electrocatalysts for anion exchange membrane water electrolysis: Design strategies and characterization approaches. <i>Renewable Energy</i> , 180, 1050-1075. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.290 | Kim, J. H.; Jo, H. J.; Han, S. M.; Kim, Y. J.; Kim, S. Y. | 2025 | Recent advances in electrocatalysts for anion exchange membrane water electrolysis: Design strategies and characterization approaches | Recent advances in electrocatalysts for anion exchange membrane water electrolysis: Design strategies and characterization approaches | Revisión de electrocatalizadores para AEMWE. | https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.290 | AEMWE; diseño de catalizadores; caracterización. | Resumir estrategias de diseño y técnicas de evaluación para catalizadores AEM. | Cubre soportes, aleaciones, y métodos de síntesis/operando. | ABA; electrocatalizadores; diseño; caracterización | SI | SI | SI |
| 38 | Kong, S., et al. (2024). Effects of dissolved 3d-block metal ions on PEM water electrolysis performance. <i>Chemical Communications</i> . https://doi.org/10.1039/d4cc04474f | Kong, S., et al. | 2024 | Effects of dissolved 3d-block metal ions on PEM water electrolysis performance | Effects of dissolved 3d-block metal ions on PEM water electrolysis performance | Estudio experimental del impacto de iones metálicos disueltos. | https://doi.org/10.1039/d4cc04474f | PEM; contaminantes metálicos; degradación. | Cuantificar pérdidas de rendimiento por iones de metales 3d. | Mide contaminación, sobrepotenciales y mecanismos de deterioro en PEM. | PEM; contaminantes; metales 3d; desempeño | SI | NO | NO |
| 39 | Kovács, M. M. (2025). Performance losses and recovery from cation contaminants in PEM water electrolysis systems. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> . In press. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.011 | Kovács, M. M. | 2025 | Performance losses and recovery from cation contaminants in PEM water electrolysis systems | Performance losses and recovery from cation contaminants in PEM water electrolysis systems | Pruebas de contaminación cationica y estrategias de recuperación. | https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.011 | PEM; contaminación; recuperación. | Evaluar impactos y protocolos de mitigación frente a cationes contaminantes. | Reporta pérdidas, diagnóstico y mitigación frente a cationes contaminantes. | PEM; contaminación; cationes; recuperación | SI | NO | NO |
| 40 | Kühnert, E., Kitzlman, O., Hacker, V., & Bodner, M. (2023). Investigation of the impact of chloride contamination on degradation in PEM water electrolyzer cells. <i>CEC Transactions</i> , 112, 485-494. https://doi.org/10.1149/11204.0485sect | Kühnert, E.; Kitzlman, O.; Hacker, V.; Bodner, M. | 2023 | Investigation of the impact of chloride contamination on degradation in PEM water electrolyzer cells | Investigation of the impact of chloride contamination on degradation in PEM water electrolyzer cells | Experimentos de degradación por cloruros en células PEM. | https://doi.org/10.1149/11204.0485sect | PEM; cloruro; degradación acelerada. | Determinar efectos y umbrales de Cl ⁻ en durabilidad de PEM. | Analiza mecanismos de corrosión y deterioro catalítico por contaminación. | PEM; cloruro; degradación; durabilidad | SI | NO | NO |
| 41 | Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. <i>Materials Science for Energy Technologies</i> , 2(3), 442-454. https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002 | Kumar, S. S.; Himabindu, V. | 2019 | Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review | Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review | Revisión de producción de H ₂ por PEM. | https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002 | PEM; producción de hidrógeno. | Resumir fundamentos, materiales, catalizadores y desempeño de PEM. | Cubre celdas, membranas, catalizadores y eficiencia energética. | PEM; revisión; hidrógeno; materiales | SI | SI | SI |
| 42 | Logan, B. E., & Rababaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. <i>Science</i> , 337(6095), 686-690. https://doi.org/10.1126/science.1217412 | Logan, B. E.; Rababaey, K. | 2012 | Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies | Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies | Perspectiva/mirada sobre MEC (MFC/MFC/MEC). | https://doi.org/10.1126/science.1217412 | Tecnologías bioelectroquímicas; valorización de residuos. | Exponer potencial de MEC para energía y químicos a partir de residuos. | Resume rutas, eficiencia y posibles aplicaciones a escala. | MEC; MFC; MEC; valorización | NO | NO | NO |
| 43 | Logan, B. E., & Regan, J. M. (2019). Microbial fuel cells: Challenges and applications. <i>Environmental Science & Technology</i> , 53(12), 5180. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02752 | Logan, B. E.; Regan, J. M. | 2019 | Microbial fuel cells: Challenges and applications | Microbial fuel cells: Challenges and applications | Revisión de MFC y aplicaciones. | https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02752 | Celdas de combustible microbianas (MFC). | Identificar retos clave y áreas de aplicación de MFC. | Analiza rendimientos, materiales y barreras de implementación. | MFC; desafíos; aplicaciones | SI | SI | SI |
| 44 | Logan, B. E., Call, D., Cheng, S., Hamelers, H. V. M., Sleutels, T. H. J. A., Jaramilla, A. W., & Rozendal, R. E. (2008). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. <i>Revista/Título</i> , fecha de publicación septiembre 25, 2008. | Logan, B. E.; Call, D.; Cheng, S.; Hamelers, H. V. M.; Sleutels, T. H. J. A.; Jaramilla, A. W.; Rozendal, R. E. | 2008 | Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter | Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter | Revisión/perspectiva funcional sobre MEC. | https://doi.org/10.1021/es080155z | MEC; alto rendimiento de H ₂ ; materia orgánica. | Presentar fundamentos y potencial de MEC para producir H ₂ . | Describe reacciones, configuración y eficiencia alcanzables. | MEC; hidrógeno; fundamentos; revisión | NO | NO | NO |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|--|------|--|--|---|---|---|--|--|--|--|--|--|
| 45 | Lopez, V. M., Ziar, H., Haworkor, J., Zeman, M., & Isabella, G. (2023). Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 182, 113407. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113407 | Lopez, V. M., Ziar, H., Haworkor, J., Zeman, M., Isabella, G. | 2023 | Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration | Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration | Revisión de operación dinámica acoplada a PV | https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113407 | PEM/AEM; integración fotovoltaica | Revisar efectos de perfiles PV en electrolisis y estrategias de mitigación | Evalúa degradación, control y dimensionamiento de balance de planta. | operación dinámica; PV, electrolizadores | | | |
| 46 | Luo, X., Kushner, D. I., & Kusoglu, A. (2023b). Anion exchange membranes: The effect of reinforcement in water and electrolyte. <i>Journal of Membrane Science</i> , 688, 121946. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121946 | Luo, X., Kushner, D. I., Kusoglu, A. | 2023 | Anion exchange membranes: The effect of reinforcement in water and electrolyte | Anion exchange membranes: The effect of reinforcement in water and electrolyte | Caracterización experimental de AEM reforzadas | https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121946 | Membranas AEM; refuerzo; hinchamiento | Cuantificar efecto del refuerzo en propiedades en agua/electrolito. | Analiza estabilidad mecánica, transporte iónico y durabilidad. | AEM; refuerzo; membranas; estabilidad | | | |
| 47 | Mallapragada, D., & Rubin, J. (2022, 1 de septiembre). Technoeconomic assessment of electrolytic hydrogen production under dynamic operations. https://hdl.handle.net/1711.1/148613 | Mallapragada, D.; Rubin, J. | 2022 | Techno-economic assessment of electrolytic hydrogen production under dynamic operations | Techno-economic assessment of electrolytic hydrogen production under dynamic operations | Modelado tecnoeconómico con perfiles dinámicos | https://hdl.handle.net/1711.1/148613 | Electrolisis bajo operación dinámica; costos. | Evaluar impacto de intermitencia en el costo del H ₂ electrolítico. | Simula estrategias operativas y costos en diferentes escenarios de red. | TEA; operación dinámica; LCCD; electrolisis | | | |
| 48 | Marchetti, A., Cerrillo Moreno, M., Lauri, R., & Zepilli, M. (2025). Optimizing hydrogen production through efficient organic matter oxidation performed by microbial electrolysis cells. <i>Processes</i> , 13(4), 1231. https://doi.org/10.3390/pr13041231 | Marchetti, A., Cerrillo Moreno, M., Lauri, R., Zepilli, M. | 2025 | Optimizing hydrogen production through efficient organic matter oxidation performed by microbial electrolysis cells | Optimizing hydrogen production through efficient organic matter oxidation performed by microbial electrolysis cells | Experimentos de optimización de oxidación anódica en MEC. | https://doi.org/10.3390/pr13041231 | MEC; oxidación de materia orgánica; H ₂ | Maximizar tasas de H ₂ optimizado reacciones anódicas. | Evalúa parámetros operativos y rendimiento financiero global. | MEC; oxidación orgánica; optimización global. | | | |
| 49 | Metcalf & Eddy. (2014). <i>Wastewater engineering: Treatment and resource recovery</i> (5.ª ed.). McGraw-Hill Education | Metcalf & Eddy | 2014 | Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5.ª ed.) | Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5.ª ed.) | Texto técnico de referencia. | https://reportor.mypolytc.edu/my/jspui/handle/123456789/458 | Ingeniería de aguas residuales; recuperación de recursos. | Proveer fundamentos y prácticas de tratamiento y valoración. | Cubre procesos convencionales y emergentes en gestión de efluentes. | tratamiento de aguas; Ingeniería; recuperación | | | |
| 50 | Nasser, M., Megahed, T. F., Ookawara, S., & Hassan, H. (2022). A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. <i>Environmental Science and Pollution Research</i> , 29(58), 86994-87018. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y | Nasser, M., Megahed, T. F., Ookawara, S., Hassan, H. | 2022 | A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems | A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems | Revisión sobre integración anódica con renovables híbridos. | https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y | Electrolisis; solar/eólica; sistemas híbridos. | Explorar arquitecturas y desempeño de sistemas híbridos con electrolisis. | Analiza control, almacenamiento y eficiencia global del sistema. | electrolisis; híbridos; solar; eólica | | | |
| 51 | Noori, M. T., Rossi, R., Logan, B. E., & Min, B. (2024). Hydrogen production in microbial electrolysis cells with biocathodes. <i>Trends in Biotechnology</i> , 42(7) | Noori, M. T.; Rossi, R.; Logan, B. E.; Min, B. | 2024 | Hydrogen production in microbial electrolysis cells with biocathodes | Hydrogen production in microbial electrolysis cells with biocathodes | Revisión focalizada en biocátodos para MEC. | https://doi.org/10.1016/j.tbiotech.2023.12.010 | MEC; biocátodos; biocorrosión. | Describir avances y retos de biocátodos para H ₂ en MEC. | Resume materiales, microorganismos y rutas catalíticas para cátodos biológicos. | MEC; biocátodos; H ₂ ; tendencias | | | |
| 52 | Phan, Q. H. H. (2025). Recent advances in reducing and eliminating the electricity power demand of microbial electrolysis cells for sustainable H ₂ production: A comprehensive review. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> . https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.023 | Phan, Q. H. H. | 2025 | Recent advances in reducing and eliminating the electricity power demand of microbial electrolysis cells for sustainable H ₂ production: A comprehensive review | Recent advances in reducing and eliminating the electricity power demand of microbial electrolysis cells for sustainable H ₂ production: A comprehensive review | Revisión de estrategias de reducción de demanda eléctrica. | https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.023 | MEC de bajo/zero consumo; integración energética. | Compilar técnicas para reducir o eliminar energía externa en MEC. | Cubre acoplamientos, catalizadores y diseños que minimizan aporte eléctrico. | MEC; energía neta; auto-suficiencia; integración | | | |
| 53 | Radhika, D., Shivakumar, A., Kasai, D. R., Koutavarapu, R., & Peera, S. G. (2022). Microbial electrolysis cell as a diverse technology: Overview of prospective applications, advancements, and challenges. <i>Energies</i> , 15(7), 2611. https://doi.org/10.3390/en15072611 | Radhika, D.; Shivakumar, A., Kasai, D. R., Koutavarapu, R., Peera, S. G. | 2022 | Microbial electrolysis cell as a diverse technology: Overview of prospective applications, advancements, and challenges | Microbial electrolysis cell as a diverse technology: Overview of prospective applications, advancements, and challenges | Revisión general sobre MEC. | https://doi.org/10.3390/en15072611 | MEC; aplicaciones; avances. | Ofrecer panorama de aplicaciones y desafíos actuales de MEC. | Discute casos de uso, materiales y métricas de desempeño. | MEC; aplicaciones; desafíos; revisión | | | |
| 54 | Ren, Z., Ruiz, J. L., Zhang, Y., Li, S., & Maravelias, C. (2024). Synergistic thermo-microbial electrochemical (T-MEC) approach for drop-in fuel production from wet waste. https://doi.org/10.2172/2515886 | Ren, Z.; Ruiz, J. L.; Zhang, Y.; Li, S.; Maravelias, C. | 2024 | Synergistic thermo-microbial electrochemical (T-MEC) approach for drop-in fuel production from wet waste | Synergistic thermo-microbial electrochemical (T-MEC) approach for drop-in fuel production from wet waste | Propuesta y evaluación conceptual T-MEC con datos de literatura. | https://doi.org/10.2172/2515886 | T-MEC; residuos húmedos; combustibles drop-in. | Integrar rutas térmicas, microbianas y electroquímicas para producir combustibles. | Propone esquema integrado para convertir residuos en combustibles compatibles. | T-MEC; residuos; combustibles; integración | | | |
| 55 | Rosenfeld, S., Cahon, R., Teller, H., & Schechter, A. (2017). A microbial electrolysis cell for bio-hydrogen production and wastewater bioremediation. <i>Proceedings of the World Congress on New Technologies</i> . https://doi.org/10.1159/ncet17_104 | Rosenfeld, S.; Cahon, R.; Teller, H.; Schechter, A. | 2017 | A microbial electrolysis cell for bio-hydrogen production and wastewater bioremediation | A microbial electrolysis cell for bio-hydrogen production and wastewater bioremediation | Experimento/conferencia prototipo MEC con pruebas de tratamiento. | https://doi.org/10.1159/ncet17_104 | MEC; bioremediación; biogénesis. | demostrar producción de H ₂ y remoción de contaminantes en MEC. | Presenta resultados de laboratorio/prototipo con métricas de desempeño. | MEC; biogénesis; bioremediación; prototipo | | | |
| 56 | Sharma, P., Singh, R., & Mehta, A. (2024). Gas purity challenges in microbial electrolysis cells. <i>Renewable Energy</i> , 223, 120060. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.120060 | Sharma, P.; Singh, R.; Mehta, A. | 2024 | Gas purity challenges in microbial electrolysis cells | Gas purity challenges in microbial electrolysis cells | Revisión y análisis de retos de pureza de gas. | https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.120060 | MEC; pureza de H ₂ ; contaminantes gaseosos. | Identificar fuentes de impurezas y soluciones para gas H ₂ en MEC. | Analiza arranque de gases, CO ₂ , CH ₄ y estrategias de separación/purificación. | MEC; pureza de gas; separación; H ₂ | | | |

| | | |
|----|----|----|
| 57 | 37 | 36 |
|----|----|----|

| Datos Generales de los seleccionados (2015-2025) | | | | | | | | | | | | Filtros | | | | |
|--|---|---|------|---|---|---|---|---|---|--|--|---|--|------------|--|--------------------|
| Numeración | Referencias en APA | Autores | Año | Titulo | Fuente | Metodología | Enlace | Tema / Tecnología | Objetivos principales | Resumen del artículo | Palabras clave | Primer Filtro (12) | | | Segundo Filtro (18) | Tercer Filtro (14) |
| | | | | | | | | | | | | Algunos no abordaban la producción de hidrógeno, otros no consideraban la viabilidad de celdas electrolíticas en dicho proceso o simplemente trataban el uso de aguas residuales de manera general, sin incluir análisis experimentales | Publicaciones fuera del periodo de estudio establecido (2010-2025) | Por título | Relación con los objetivos específicos | |
| 1 | Battle-Vanova, P., Pulig, S., Gonzalez-Olmos, R., Balaguer, M. D., & Colpin, J. (2016). Continuous acetate production through microbial electroynthesis from CO ₂ with microbial mixed culture. <i>Journal of Chemical Technology and Biotechnology</i> , 89(8), 1131-1136. https://doi.org/10.1002/jctb.4365 | Battle-Vanova, P.; Pulig, S.; Gonzalez-Olmos, R.; Balaguer, M. D.; Colpin, J. | 2016 | Continuous acetate production through microbial electroynthesis from CO ₂ with microbial mixed culture | Continuous acetate production through microbial electroynthesis from CO ₂ with microbial mixed culture | Experimentos de electroíntesis microbiana en flujo continuo. | https://doi.org/10.1002/jctb.4365 | Electroíntesis microbiana; producción de acetato; CO ₂ a químinos. | demostrar producción continua de acetato desde CO ₂ con cultivos mixtos. | Evalúa rendimiento y condiciones operativas para maximizar conversión productiva. | electroíntesis; acetato; CO ₂ cultivos mixtos | Si | Si | Si | Si | Si |
| 2 | Becker, H., Marawski, J., Shinde, D. V., Stephens, I. E. L., Hinds, G., & Smith, G. (2023). Impact of impurities on water electrolysis: A review. <i>Sustainable Energy & Fuels</i> , 7(17), 1565-1603. https://doi.org/10.1039/c3se01317 | Becker, H.; Marawski, J.; Shinde, D. V.; Stephens, I. E. L.; Hinds, G.; Smith, G. | 2023 | Impact of impurities on water electrolysis: A review | Impact of impurities on water electrolysis: A review | Revisión sobre impurizar y degradación. | https://doi.org/10.1039/c3se01317 | Efecto de impurezas; durabilidad; AEL/PEM/AEM. | Compilar efectos de contaminantes en rendimiento y vida útil de electrolizadores. | Resume mecanismos de envenenamiento, mitigación y requisitos de calidad del agua. | impurezas; degradación; pureza de agua; durabilidad | Si | Si | Si | Si | Si |
| 3 | Brauns, J., & Turlek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. <i>Processes</i> , 8(2), 248. https://doi.org/10.3390/pr8020248 | Brauns, J.; Turlek, T. | 2020 | Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review | Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review | Revisión de AEL aceptada a renovables. | https://doi.org/10.3390/pr8020248 | AEL; integración con renovables; operación dinámica. | Revisar estado del arte y retos de AEL bajo potencia variable. | Cubre configuraciones, eficiencia, y estrategias para responder a intermitencia. | AEL; renovables; operación dinámica; eficiencia | Si | Si | Si | Si | Si |
| 4 | Butler, A., & Spliethoff, H. (2017). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 82, 2440-2464. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003 | Butler, A.; Spliethoff, H. | 2017 | Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review | Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review | Revisión integral de P2G/P2L y electrolisis. | https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003 | Electrolisis; almacenamiento; acoplamiento sectorial. | Evaluar el rol de la electrolisis en redes y acoplamiento sectorial. | Análisis aplicaciones, eficiencia y economía de hidrógeno para balanceo de red. | power-to-gas; power-to-liquids; redes; almacenamiento | Si | Si | Si | Si | Si |
| 5 | Chen, P., & Hu, X. (2020). High-efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts. <i>Advanced Energy Materials</i> , 10(39), 2002285. https://doi.org/10.1002/aem.2002285 | Chen, P.; Hu, X. | 2020 | High-efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts | High-efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts | Estudio experimental de AEMWE con catalizadores económicos. | https://doi.org/10.1002/aem.2002285 | AEM water electrolysis; catalizadores no nobles. | demostrar alto rendimiento de AEMWE con materiales de bajo costo. | Optimiza electrocatalizadores y condiciones para mejorar eficiencia en AEM. | AEM; electrocatalizadores; eficiencia; bajo costo | Si | Si | Si | Si | Si |
| 6 | Chou, H. (2023). Techno-economic assessment of microbial electrolysis cells for hydrogen production. <i>Renewable Energy</i> , 209, 455-465. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.033 | Chou, H. | 2023 | Techno-economic assessment of microbial electrolysis cells for hydrogen production | Techno-economic assessment of microbial electrolysis cells for hydrogen production | Evaluación técnico-económica basada en modelos y datos de literatura. | https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.033 | MEC; análisis TEA; producción de H ₂ . | Cuantificar costos, eficiencia y escalabilidad de MEC para H ₂ . | Modela CAPEX/OPEX y sensibilidad a parámetros clave de operación y escala. | TEA; MEC; costos; escalado | Si | Si | Si | Si | Si |
| 7 | Cusick, R. D., Bryan, B., Parker, D. S., Merrill, M. D., Mehanha, M., Kelly, P. D., ... & Logan, B. E. (2011). Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater. <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i> , 89, 2053-2063. https://doi.org/10.1007/s00253-011-1130-9 | Cusick, R. D.; Bryan, B.; Parker, D. S.; Merrill, M. D.; Mehanha, M.; Kelly, P. D.; ...; Logan, B. E. | 2011 | Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater | Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater | Planta piloto de flujo continuo con aguas residuales de uva. | https://doi.org/10.1007/s00253-011-1130-9 | MEC piloto; tratamiento de aguas; H ₂ . | Evaluar desempeño real de MEC a escala piloto con efluente real. | Reporta tasas de H ₂ , remoción de DQO y eficiencia energética en condiciones operativas. | MEC; piloto; aguas residuales; uva | Si | Si | Si | Si | Si |
| 8 | Electric Power Research Institute. (s.f.). EPRI home. https://www.epri.com/research/products/00000003002025148 | Electric Power Research Institute (EPRI) | s.f. | EPRI home | EPRI home | Portal informativo de programas productos. | https://www.epri.com/research/products/00000003002025148 | H ₂ eléctrica; hidrógeno; tecnologías de red. | Proveer acceso a productos de investigación y referencias técnicas. | Página de aterrizaje para búsquedas de informes y proyectos relevantes. | EPRI; investigación; energía; hidrógeno | Si | Si | Si | Si | Si |
| 9 | European Commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf | European Commission | 2020 | A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe | A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe | Documento de política pública y hoja de ruta. | https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf | Estrategia de hidrógeno; UE. | Definir plan europeo para escalado de hidrógeno limpio. | Establece metas, inversiones y marcos regulatorios para 2020-2050. | política; UE; hidrógeno; estrategia | Si | Si | Si | Si | Si |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|---------------------------------|------|--|--|--|---|---|---|--|---|--|--|--|
| 34 | Wang, L., Linowski, K., & Liu, H. (2022). Scalable membrane-less microbial electrolysis cell with multiple compact electrode assemblies for high performance hydrogen production. <i>Chemical Engineering Journal</i> , 454, 140257. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140257 | Wang, L.; Linowski, K.; Liu, H. | 2022 | Scalable membrane-less microbial electrolysis cell with multiple compact electrode assemblies for high performance hydrogen production | Scalable membrane-less microbial electrolysis cell with multiple compact electrode assemblies for high performance hydrogen production | Diseño y pruebas de MEC sin membrana con múltiples electrodos. | https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140257 | MEC sin membrana; escalabilidad; H ₂ | Aumentar rendimiento con unidades compactas de electrodos en paralelo. | Muestra altas tasas de H ₂ y baja resistencia interna sin membrana. | MEC sin membrana; escalable; electrodos | | | |
| 35 | Yang, F., Li, X., & Yu, H. (2020). Pilot scale study of microbial electrolysis cells for wastewater treatment and hydrogen production. <i>Water Research</i> , 178, 115819. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115819 | Yang, F.; Li, X.; Yu, H. | 2020 | Pilot scale study of microbial electrolysis cells for wastewater treatment and hydrogen production | Pilot scale study of microbial electrolysis cells for wastewater treatment and hydrogen production | Estudio a escala piloto con aguas reales. | https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115819 | MEC piloto; tratamiento; H ₂ | Validar desempeño de MEC a escala piloto en condiciones reales. | Reporta remociones de DQO y tasas de producción bajo operación continua. | MEC piloto; Water Research; hidrogeno | | | |
| 36 | Zhang, Y., Liu, H., & Cheng, S. (2020). Materials and designs for microbial electrolysis cells: Current status and future perspectives. <i>Journal of Power Sources</i> , 450, 227636. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227636 | Zhang, Y.; Liu, H.; Cheng, S. | 2020 | Materials and designs for microbial electrolysis cells: Current status and future perspectives | Materials and designs for microbial electrolysis cells: Current status and future perspectives | Revisión de materiales y diseño de MEC. | https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227636 | MEC; materiales; diseño. | Sintetizar avances en materiales de electrodos y arquitecturas de celdas. | Discute desafíos de durabilidad y eficiencia y direcciones futuras. | MEC; materiales; diseño; perspectivas | | | |

| Año | # de artículos |
|------|----------------|
| 2015 | 0 |
| 2016 | 2 |
| 2017 | 3 |
| 2018 | 1 |
| 2019 | 4 |
| 2020 | 6 |
| 2021 | 1 |
| 2022 | 5 |
| 2023 | 6 |
| 2024 | 6 |
| 2025 | 1 |

