

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE LA PRODUCCIÓN BIOELECTROQUÍMICA
DEL HIDRÓGENO: AVANCES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Juan Sebastian Tarazona Ortega, Michelle Vanessa Herrera Velasco.

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, a quien dedico este logro y toda mi vida. Por permitirme honrar a mis padres y a mi familia a través de este logro. No soy digno de tan grande misericordia y amor

A mis padres, los verdaderos protagonistas de este título. Nada de esto sería posible sin ustedes, me siento profundamente orgulloso de ser su hijo y reconozco que este logro les pertenece tanto más a ustedes que a mí. Gracias por su amor, sus sacrificios, lágrimas y oraciones.

A mi hermano Santiago, a quien tengo el honor de cuidar y el compromiso de inspirar. Estoy seguro de que tu momento de graduación llegará pronto, y brillarás con luz propia.

Este logro es nuestro. De familia. De amor. De fe.

Juan Sebastian Tarazona Ortega.

A mi mamá,

por tu amor, tu apoyo y tu fuerza.

Todo lo que soy, te lo debo.

Este logro es nuestro.

Michelle Vanessa Herrera Velasco.

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios, su infinita misericordia me guio hasta aquí. Mi vida, mi salud y la de aquellos seres a los que amo, solo vienen y vinieron de ti, mi Jesús amado, sin importar mis pecados y fallas tu fidelidad eterna fue el centro de todo.

A mi madre, la mujer que me enseñó a soñar en grande y que con su amor, paciencia, esfuerzo incansable y entrega incondicional han sido el cimiento de todo lo que hoy soy. Sé que gran parte de su vida y salud junto con lágrimas en momentos difíciles fueron entregadas para brindarme lo mejor, y por eso, mi gratitud es eterna. Tu amor tan puro e inmerecido me ha motivado en mi debilidad.

A mi padre, por su comprensión, apoyo constante y por ser ese respaldo silencioso pero firme en cada etapa de mi carrera. Desde que llegaste nunca dudaste en estar. Mi agradecimiento, admiración y respeto por ser un padre excelente.

A mis abuelos quienes, con sus palabras, cargadas de experiencia y sabiduría, fueron brújula en más de una encrucijada. Gracias por enseñarme el valor de lo simple y lo verdadero. Mis raíces nunca serán olvidadas gracias a ustedes.

A Xiomara, mi compañera de vida. Gracias por ser mi apoyo en los momentos más difíciles, por tu paciencia, por inspirarme cada día y por tu amor incondicional. Eres fiel testigo de mis momentos más personales y difíciles a lo largo de mi vida y con toda seguridad puedo decir que nunca me faltó tu apoyo. Mi inspiración y motivación nacieron muchas veces en tu mirada y en el vivir una vida junto a ti.

Y a mi amiga y compañera Michelle. Por su amistad real y sincera, por su compañía en muchas circunstancias de este camino.

A todos ustedes, mis más profundo e inmensurable agradecimiento.

Juan Sebastian Tarazona Ortega

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional, en especial a mi madre Heidy Velasco por ser mi polo a tierra y enseñarme con su ejemplo a afrontar la vida con valentía y berraquera, gracias por ser mi fuerza, porque me viste caer y con amor me levantaste, por cada oración silenciosa, pero sobre todo por confiar y creer en mí. Este logro tiene sus nombres escritos en cada página porque sin ustedes nada hubiese sido posible. Los amo.

A mi hermano Samuel, fuiste mi motor silencioso y aunque quizás no entiendas del todo este logro, quiero que sepas que tú también hiciste parte de él.

A mi gato Molly, por ser mi silenciosa compañía en las noches más largas, por acurrucarte junto a mí cuando el cansancio me vencía y por recordarme, con un simple ronroneo, que nunca estuve sola en este camino.

A mis amigos Heidy, Armando y Jair, gracias por ser mi refugio y crecer conmigo, por estar cuando la vida era más simple y también por quedarse cuando empezó a complicarse. Tienen un lugar en mi corazón.

A mi compañera y futura colega Laura, por caminar juntas este camino, por compartir desvelos, apuntes, frustraciones y logros, siempre estaré profundamente agradecida por tu amistad.

A mis profesores, en especial al profesor Sergio Blanco, por compartir no solo su conocimiento, sino también su vocación, paciencia y compromiso. Gracias por enseñarme a pensar con criterio, a cuestionar con respeto y a crecer con disciplina. Su huella quedará en cada logro que construya a partir de aquí.

Finalmente, a mi amigo y colega, Sebastián, gracias por caminar a mi lado en este proceso, por tu compromiso, tu apoyo incondicional y por convertir el estrés en aprendizaje compartido. No fue fácil, pero lo logramos juntos.

Michelle Vanessa Herrera Velasco

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1.1. Justificación	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo General	13
1.2.2. Objetivos Específicos.....	13
1.3. Metodología	14
1.3.1. Definición del tema de estudio	14
1.3.2. Búsqueda y recopilación de literatura científica relevante	14
1.3.3. Evaluación y clasificación de la información recolectada	15
1.3.4. Análisis bibliométrico de la literatura.....	15
1.3.5. Análisis e interpretación crítica de la información	15
1.3.6. Redacción y estructuración del documento final	15
1.4. Análisis bibliométrico	16
2. Marco Conceptual.....	19
2.1. El Hidrogeno y su contexto actual	19
2.2. Producción Bioelectroquímica de Hidrógeno (BEH)	20
3. Configuración de sistemas bioelectroquímicos	21
4. Microorganismos	24
5. Electrodo en sistemas BEH	29
5.1. Ánodos	29
5.1.1. Materiales convencionales en ánodos	30

5.1.2. Materiales avanzados y modificaciones novedosas	30
5.1.2.1. Conductividad.....	31
5.1.2.2. Biocompatibilidad.....	31
5.1.2.3. Bioánodos especiales.	32
5.2. Cátodos	33
5.2.1. Cátodos convencionales.....	33
5.2.2. Cátodos alternativos.....	35
6. Electrocatalizadores	35
7. Condiciones Operativas	39
7.1. Efectos del pH.....	39
7.2. Efecto de la temperatura	40
7.3. Efecto de la salinidad.....	42
7.4. Efecto de la inanición de nutrientes	43
7.5. Modo de operación: lote vs. Flujo continuo	44
8. Biomasa usada en la producción bioelectroquímica de hidrogeno (BEH).....	45
8.1. Orina humana.....	45
8.2. Efluentes de digestión anaerobia	46
8.3. Sustratos sintéticos.....	46
8.4. Residuos orgánicos diversos	46
9. Desafíos técnicos, económicos y ambientales de la implementación de la BEH	47
10. Conclusiones.....	49
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Comparación del uso de DES para sistemas de una sola cámara.</i>	21
Tabla 2. <i>Tabla comparativa de los principales microorganismos electroactivos estudiados.</i>	24
Tabla 3. <i>Síntesis de información sobre los ánodos estudiados.</i>	32
Tabla 4. <i>Materiales de cátodos presentes en la literatura</i>	34
Tabla 5. <i>Tabla comparativa sobre los electrocatalizadores estudiados.</i>	36
Tabla 6. <i>Tabla comparativa de los tipos de biomasa utilizados en la producción bioelectroquímica de hidrógeno (BEH).</i>	47

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra la metodología a utilizar en el desarrollo de la presente investigación.	14
Figura 2. <i>Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) publicados por año</i>	16
Figura 3. <i>Tipos de Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc)</i> ...	17
Figura 4. <i>Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) por autores</i>	18
Figura 5. <i>Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) publicados por países</i>	18
Figura 6. <i>Representación esquemática y montaje experimental de BEF-1 (integración MEC-MEC) y BES-2 (integración MEC-MFC)</i>	23

Resumen

Título: Revisión del estado del arte sobre la producción bioelectroquímica del hidrógeno: avances, desafíos y perspectivas futuras.

Autor: Juan Sebastian Tarazona Ortega, Michelle Vanessa Herrera Velasco.

Palabras Clave: Producción bioelectroquímica de hidrógeno, microorganismos electroactivos, celdas de electrolisis microbiana, hidrógeno verde, reacción de evolución de hidrógeno.

Descripción: La Producción Bioelectroquímica de Hidrógeno (BEH) brinda una alternativa sostenible frente a los métodos convencionales de producción de hidrógeno al utilizar microorganismos electroactivos en celdas de electrólisis microbiana (Microbial Electrolysis Cells - MEC) para transformar residuos orgánicos en hidrógeno. Esta investigación presenta una revisión bibliográfica detallada sobre los avances más recientes en electrodos y electrocatalizadores aplicados a la BEH, presentando materiales novedosos y prometedores, como ejemplo los nanomateriales como disulfuro de molibdeno (MoS_2), aleaciones basadas en níquel, y compuestos híbridos como $\text{Fe}_3\text{C}/\text{Fe}$ embebidos en carbono poroso, que han demostrado mejorar significativamente la reacción de evolución de hidrógeno (Hydrogen Evolution Reaction - HER) y la transferencia de electrones. Además, también se analizan configuraciones de celdas, tipos de biomasa, microorganismos más eficientes y condiciones operativas evaluando su impacto en la producción de hidrógeno, la sostenibilidad del proceso y la escalabilidad tecnológica. Los resultados indicaron que la ingeniería de electrodos combinada con la selección de electrocatalizadores económicos y altamente activos impulsa la adopción de la BEH como tecnología clave para la producción de hidrógeno verde gracias a la reducción de costos operativos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Review of the state of the art on Bioelectrochemical Hydrogen Production: Advances, Challenges, and Future Perspectives

Author(s): Juan Sebastian Tarazona Ortega, Michelle Vanessa Herrera Velasco.

Key Words: Bioelectrochemical hydrogen production, electroactive microorganisms, microbial electrolysis cells, green hydrogen, hydrogen evolution reaction.

Description: Bioelectrochemical Hydrogen Production (BHP) offers a sustainable alternative to conventional hydrogen production methods by utilizing electroactive microorganisms in Microbial Electrolysis Cells (MECs) to convert organic waste into hydrogen. This study presents a comprehensive literature review on the latest advancements in electrode and electrocatalyst development applied to BHP, highlighting novel and promising materials such as nanomaterials like molybdenum disulfide (MoS_2), nickel-based alloys, and hybrid compounds such as $\text{Fe}_3\text{C}/\text{Fe}$ embedded in porous carbon, all of which have demonstrated significant improvements in the hydrogen evolution reaction (HER) and electron transfer efficiency. Additionally, the review examines cell configurations, types of biomass, high-performance microorganisms, and operational conditions, evaluating their impact on hydrogen yield, process sustainability, and technological scalability. The findings suggest that advanced electrode engineering, combined with the selection of cost-effective and highly active electrocatalysts, enhances the viability of BHP as a key technology for green hydrogen production, primarily through the reduction of operational costs.

* Undergraduate work

**Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: Sergio Ismael Blanco. PhD in Engineering.

Introducción

El acoplamiento de sistemas energéticos sostenibles ha tomado una gran importancia mundial debido al preocupante agotamiento de los combustibles fósiles y al cambio climático. Ante esto, el hidrógeno nace como una solución atractiva destacando por su capacidad de liberar energía y a su vez no generar ningún producto contaminante (Dawood et al., 2020). Existen diferentes técnicas para producir hidrógeno de las cuales algunas resultan ser contaminantes, sin embargo, junto a estas numerosas técnicas se encuentra la Producción Bioelectroquímica de Hidrógeno (BEH) que se posiciona como una alternativa innovadora y sostenible la cual aprovecha la capacidad de ciertos microorganismos electroactivos para transformar materia orgánica en hidrógeno gracias a procesos bioelectroquímicos que ocurren comúnmente en celdas de electrólisis microbiana (MEC) (Noori et al., 2024); (Sikarwar et al., 2025).

Si se compara la BEH con los métodos convencionales de producción de hidrogeno como el reformado de gas natural o la electrólisis del agua, se puede deducir que la BEH ofrece ventajas importantes en términos de sostenibilidad sobre las demás debido al menor consumo energético y a la implementación de residuos orgánicos considerados desechos (Guerrero-Sodric et al., 2024). Los parámetros de eficiencia de conversión energética y la viabilidad económica en la BEH están definidas algunos factores como: diseño de las celdas, materiales utilizados en los electrodos y el uso de electrocatalizadores, entre otros. Estos factores importantes se encuentran actualmente en fases activas de investigación y desarrollo, con el propósito de alcanzar una mayor escalabilidad y eficiencia (Hwang et al., 2022).

Este trabajo de revisión tiene como propósito analizar críticamente el estado actual del conocimiento en torno a la producción bioelectroquímica de hidrógeno, prestando atención principalmente al rol que desarrolla la ingeniería de materiales en los diferentes elementos que

componen esta técnica. También se realiza un análisis en profundidad de los factores que influyen en el rendimiento de la BEH, permitiendo identificar los avances tecnológicos más sobresalientes, los desafíos latentes y las oportunidades que existen para ubicar esta tecnología como una herramienta clave en la transición hacia una economía energética circular y baja de carbono.

1.1. Justificación

El hidrógeno es un vector energético clave en la búsqueda de soluciones a los problemas relacionados con la contaminación y las afecciones al medio ambiente, a pesar de que la combustión de hidrógeno no genera productos contaminantes, el hidrógeno presenta diversos retos relacionados principalmente con su producción, transporte y almacenamiento. La producción de hidrógeno representa una importancia estratégica, dado que su impacto ambiental depende en gran parte del método empleado para su generación. El desarrollo de técnicas de producción de hidrógeno mediante tecnologías sostenibles que superen en costo y escalabilidad a las técnicas convencionales es el principal objetivo en el camino a alcanzar una fuente energética libre de carbono. Entre diversas técnicas nuevas se encuentra la Producción Bioelectroquímica de Hidrógeno (BEH) la cual es una alternativa diferente que permite obtener hidrógeno a partir de desechos orgánicos mediante procesos biológicos y electroquímicos que generan energía limpia, contribuyen al tratamiento de aguas residuales y a la valorización de residuos.

A pesar de los avances alcanzados en los últimos años, la BEH se enfrenta a grandes desafíos como la baja eficiencia de conversión energética, la limitada durabilidad de los materiales electroquímicos y la necesidad de optimizar las comunidades microbianas para maximizar la producción de hidrógeno (Sikarwar et al., 2025). Además, se presentan limitaciones como la falta de estudios comparativos y revisiones sistemáticas que integren los avances recientes en

materiales, diseño de reactores y biología microbiana, lo cual dificulta la identificación de estrategias claras para superar estas limitaciones. Por lo tanto, una revisión crítica y actualizada del estado del arte en la producción bioelectroquímica de hidrógeno es clave para orientar futuras investigaciones y acelerar el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Realizar un análisis crítico y sistemático de la literatura científica reciente sobre la producción bioelectroquímica de hidrógeno, con el fin de identificar los avances tecnológicos, los desafíos actuales y las oportunidades futuras en este campo emergente.

1.2.2. Objetivos Específicos

Examinar los fundamentos científicos y tecnológicos de la producción bioelectroquímica de hidrógeno, abarcando los principios electroquímicos, biológicos y microbianos del proceso.

Analizar el rol de los microorganismos y su optimización mediante técnicas de selección, modificación genética y condiciones de operación, en función de su impacto sobre la eficiencia del sistema.

Evaluar los materiales utilizados en los sistemas bioelectroquímicos, incluyendo electrodos y electrocatalizadores, con base en criterios de eficiencia, durabilidad y viabilidad económica.

Explorar las aplicaciones actuales y potenciales de esta tecnología en sectores estratégicos como la energía renovable, la industria química y la sostenibilidad ambiental.

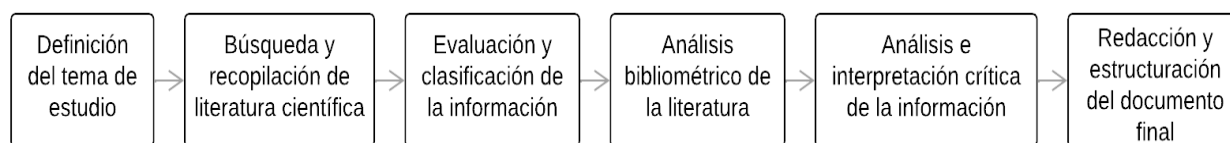
Identificar los principales desafíos técnicos, económicos y ambientales de su implementación a gran escala, así como las perspectivas futuras y líneas de investigación emergentes.

1.3. Metodología

Con el fin de presentar de manera clara y estructurada las etapas desarrolladas durante el proceso investigativo, a continuación, se presenta en la figura 1 la metodología aplicada en esta investigación.

Figura 1.

Diagrama de flujo que ilustra la metodología a utilizar en el desarrollo de la presente investigación.



1.3.1. Definición del tema de estudio

La presente revisión bibliográfica inicia con la delimitación del tema central: la producción bioelectroquímica de hidrógeno. Se revisaron antecedentes y fundamentos teóricos que permitieron precisar el alcance del trabajo, enfocado en los sistemas bioelectroquímicos, su configuración, condiciones operativas, avances tecnológicos, limitaciones actuales y perspectivas a futuro.

1.3.2. Búsqueda y recopilación de literatura científica relevante

Una vez delimitado el tema, se llevó a cabo la búsqueda de literatura especializada en bases de datos académicas de la universidad, priorizando publicaciones recientes (últimos 10 años) y de alto impacto. Se seleccionaron artículos científicos originales, revisiones bibliográficas, capítulos de libros y tesis de posgrado que trataran sobre tecnologías bioelectroquímicas aplicadas.

1.3.3. Evaluación y clasificación de la información recolectada

Posteriormente, se organizó la información recolectada mediante un proceso de filtrado que consideró criterios como la relevancia temática, el año de publicación, el tipo de estudio (experimental o de revisión) y su contribución directa al entendimiento de la producción bioelectroquímica de hidrógeno. Esta etapa incluyó el uso de gestores bibliográficos y matrices de análisis para facilitar la comparación entre trabajos

1.3.4. Análisis bibliométrico de la literatura

Se empleó la herramienta Scopus para realizar un análisis bibliométrico que permitiera identificar tendencias en la investigación, tales como número de publicaciones por año, países y autores más productivos, revistas especializadas, y evolución temática. Este análisis contribuyó a contextualizar el estado actual del conocimiento en el área.

1.3.5. Análisis e interpretación crítica de la información

La literatura seleccionada fue analizada a profundidad para identificar configuraciones de sistemas bioelectroquímicos, condiciones operativas empleadas, materiales utilizados, rendimientos obtenidos y desafíos técnicos. También se identificaron los enfoques predominantes de investigación y las oportunidades para el desarrollo futuro en el campo.

1.3.6. Redacción y estructuración del documento final

Se integró toda la información analizada en un documento estructurado que abarca los avances, limitaciones y perspectivas futuras en la producción bioelectroquímica de hidrógeno, cumpliendo con los objetivos propuestos y con los lineamientos metodológicos establecidos para trabajos de revisión científica.

1.4. Análisis bibliométrico

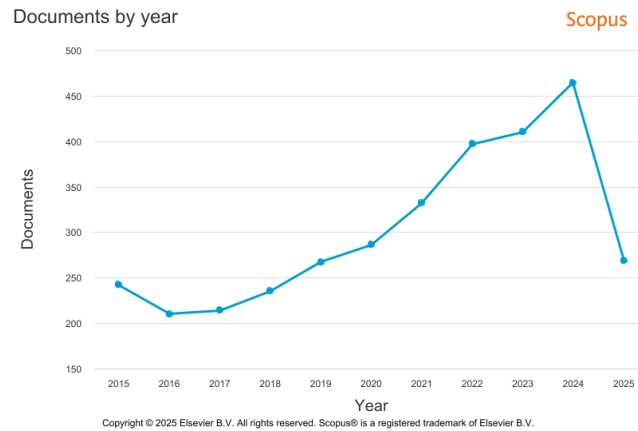
Para la recopilación de información científica relevante en el marco del presente proyecto de grado, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus aplicando la estrategia de búsqueda se centró en el uso de palabras clave relacionadas con la temática de estudio, tales como: “hidrógeno”, “producción”, “microorganismos”, “celdas” y “electrodos”, entre otras. También se aplicaron filtros para limitar los resultados a documentos académicos de alto valor, seleccionando artículos científicos, capítulos de libros y publicaciones en revistas arbitradas. Con el fin de garantizar la actualidad de la información, se priorizó la inclusión de estudios publicados en los últimos diez años.

A partir de la búsqueda realizada en la base de datos Scopus, se identificaron 3.326 artículos científicos publicados entre 2015 y 2025 relacionados con la producción de bioelectroquímica del hidrógeno. El análisis evidenció un crecimiento progresivo en la producción académica, alcanzando su punto más alto en 2024, como se observa en la gráfica “Documents by year” (ver figura 2). Este aumento refleja el creciente interés global por el desarrollo de tecnologías sostenibles para la generación de hidrógeno.

Figura 2.

Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) publicados por año.

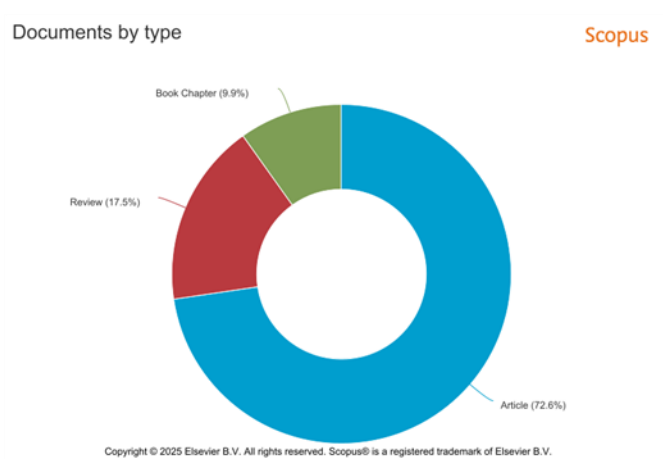
Tomado de: Spocus (sciencedirect).



En cuanto a las fuentes más relevantes, la mayoría de los documentos correspondieron a artículos científicos (72.6 %), seguidos de revistas (17.5 %) y capítulos de libros (9.9 %), lo cual se aprecia en la gráfica “*Documents by type*” (ver figura 3). Esto indica que la mayor parte de la producción tiene un carácter original y experimental.

Figura 3.

Tipos de Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc). Tomado de: Spocus (sciencedirect).



En la gráfica “*Documents by author*” (ver figura 4), se destacan autores como Kim, S.H., Kumar, G. y Zhang, Q., con más de 80 publicaciones cada uno, lo que evidencia su liderazgo en

esta línea de investigación. Por otro lado, el análisis por país, presentado en la gráfica “*Documents by country or territory*” (ver figura 5), revela que India y China son los países con mayor volumen de publicaciones, seguidos por Corea del Sur, Malasia y Estados Unidos. Esto pone en evidencia el protagonismo de Asia en el avance científico sobre tecnologías bioenergéticas.

Figura 4.

Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) por autores. Tomado de: Scopus (sciencedirect).

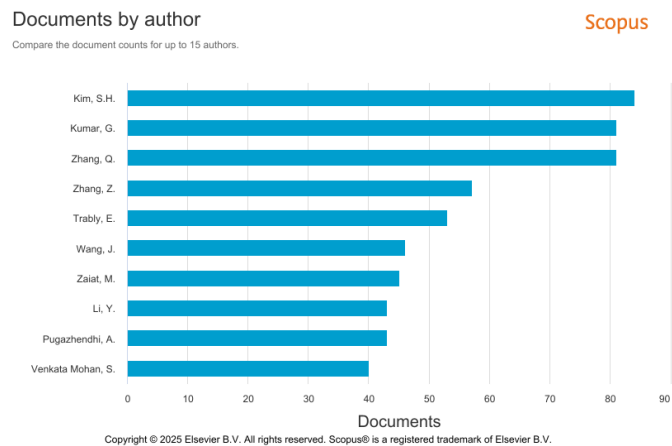
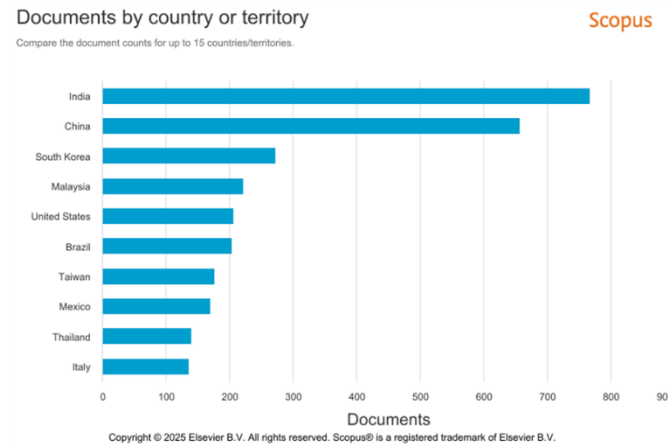


Figura 5.

Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) publicados por países.

Tomado de: Scopus (sciencedirect).



Este análisis permitió identificar tendencias clave en la investigación, autores e instituciones líderes, así como regiones con mayor desarrollo en esta área. Todo ello sirvió como base para contextualizar el estado actual del conocimiento y delimitar el enfoque de esta monografía.

2. Marco Conceptual

2.1. El Hidrogeno y su contexto actual

El hidrógeno tiene alta densidad energética (120 MJ/kg) y ausencia de emisiones contaminantes al momento de su combustión, pero esto no significa que sea un combustible totalmente limpio (Dawood et al., 2020). El impacto ambiental del hidrógeno se encuentra en su técnicas de producción entre las cuales se destacan las siguientes tres técnicas: el denominado hidrógeno gris procedente del reformado con vapor de gas natural y libera grandes cantidades de CO₂, el hidrógeno azul que incorpora captura y almacenamiento de carbono y el hidrógeno verde el cual se obtiene por electrólisis alimentada con fuentes renovables cuyo impacto ambiental es muy bajo sin emisiones contaminantes (Acar & Dincer, 2014).

2.2. Producción Bioelectroquímica de Hidrógeno (BEH)

La producción bioelectroquímica de hidrógeno es un proceso que se basa en la capacidad de ciertos microorganismos electroactivos para degradar materia orgánica gracias a su metabolismo y de esta manera liberar electrones. Estos electrones son transferidos fuera de los microorganismos a través de diversos mecanismos, como nanohilos conductores, citocromos de membrana externa o mediadores redox solubles. Después de que estos electrones son liberados, se dirigen a un circuito electroquímico en el cual, mediante la aplicación de un potencial eléctrico externo, se promueve la reducción de protones (H^+) en el cátodo, dando lugar a la formación de hidrógeno molecular (H_2). Esta transformación ocurre en lo que se conoce como sistema bioelectroquímico (BES, por sus siglas en inglés) y se define como un conjunto estructurado creado para facilitar procesos de conversión energética. Entre los sistemas bioelectroquímicos, la celda de electrólisis microbiana (MEC) representa el diseño más estudiado y aplicado. Una MEC está compuesta esencialmente por un ánodo, donde ocurre la oxidación de la materia orgánica; un cátodo, donde se lleva a cabo la reducción de protones; un circuito eléctrico externo que permite el flujo de electrones; y, opcionalmente, una membrana separadora que evita la mezcla directa entre los productos generados en ambas cámaras sin impedir el intercambio iónico necesario para mantener el equilibrio del sistema (Mateos González, 2025).

Esta técnica surge como una opción donde los desechos orgánicos y residuos industriales sean aprovechados como materia prima para producir hidrógeno de manera sostenible dentro de una economía circular libre de combustibles fósiles. Aunque su perspectiva futura es prometedora, la realidad es que la BEH es una tecnología compleja cuya eficiencia de producción de hidrógeno depende de múltiples factores relacionados entre sí y que involucra un profundo conocimiento y

desarrollo científico para optimizar y perfeccionar cada uno de estos factores los cuales son analizados en la presente revisión bibliográfica.

3. Configuración de sistemas bioelectroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos son el centro operativo de la BEH cuya configuración interna afecta directamente en la eficiencia del sistema (Anoy et al., 2024). La celda de electrólisis microbiana (MEC) es el sistema bioelectroquímico más utilizado en la BEH, funcionando como la base experimental de todos los estudios aquí analizados (Guerrero-Sodric et al., 2024). La disposición estructural de los componentes y el diseño funcional de las MEC son los que determinan factores como el transporte de electrones, la formación de biopelículas y la evolución de hidrógeno. Esta sección analiza las principales configuraciones empleadas en sistemas BEH y su impacto sobre el rendimiento bioelectroquímico.

Las MEC de una cámara y dos cámaras, son las configuraciones más frecuentemente usadas en la BEH. En configuraciones de una sola cámara (Anoy et al., 2024), analiza un sistema MEC que incorpora un separador direccional de electrodos *DES* (por sus siglas en inglés *Directional Electrode Separator*) con el objetivo de reducir la migración de H_2 al ánodo y aumentar la eficiencia de transferencia electrónica. La tabla 1 presenta un análisis comparativo del uso de DES para sistemas de una sola cámara donde se evidencia claramente la mejoría en el sistema gracias principalmente a que evita la reoxidación de H_2 permitiendo que los electrones generados por los microorganismos sean aprovechados eficientemente.

Tabla 1.

Comparación del uso de DES para sistemas de una sola cámara.

PARÁMETROS	CON DES	SIN DES
Densidad de corriente máxima	65,22 A/m ²	16 A/m ²
Migración de H ₂ al ánodo	4% - 5%	30% - 38%
Conductividad protónica	456 μS/mm	67 μS/mm
Estabilidad	>8 días	variable

En configuraciones de dos cámaras, Guerrero-Sodric et al. (2024) utilizaron membranas de intercambio aniónico para separar los compartimentos, logrando una producción de hidrógeno superior a 17 mL/L·día y eficiencias de recuperación catódica superiores al 80 %. Las MEC de dos cámaras generalmente son más eficientes debido a la separación física mediante una membrana, esto evita la recombinación de productos y permite un mejor control del proceso redox. Jadhav et al. (2024) presentan de manera interesante un complejo sistema de tres cámaras donde la configuración consta de un ánodo central común y dos cámaras catódicas dispuestas a sus extremos, como se presenta más adelante en la figura 2. En el primer caso (BES-1), Las tres celdas están separadas mediante membranas de intercambio protónico favoreciendo un balance iónico eficiente que optimiza la utilización de protones generados durante la oxidación anódica y de esta manera se mitigan los desequilibrios de pH que suelen limitar la cinética electroquímica. Con ánimo de realizar un estudio aún más novedoso, se desarrolla un segundo sistema (BES-2) idéntico al primer sistema con el único cambio de realizar la integración de una celda de combustible microbiana (MFC) con una celda de electrólisis microbiana (MEC) dentro de un mismo sistema, generando como producto electricidad además de hidrógeno.

Estos dos sistemas utilizan acetato (CH_3COO) como sustrato orgánico por lo cual la reacción (1) se presentan en la cámara central de ambos sistemas. A continuación, se presentan las reacciones que ocurren en los electrodos de cada cámara:

Cámara central sistema BES-1 y BES-2:



Cámaras catódicas BES-1 y MECL del sistema BES-2:



Cámara catódica MFCR sistema BES-2:

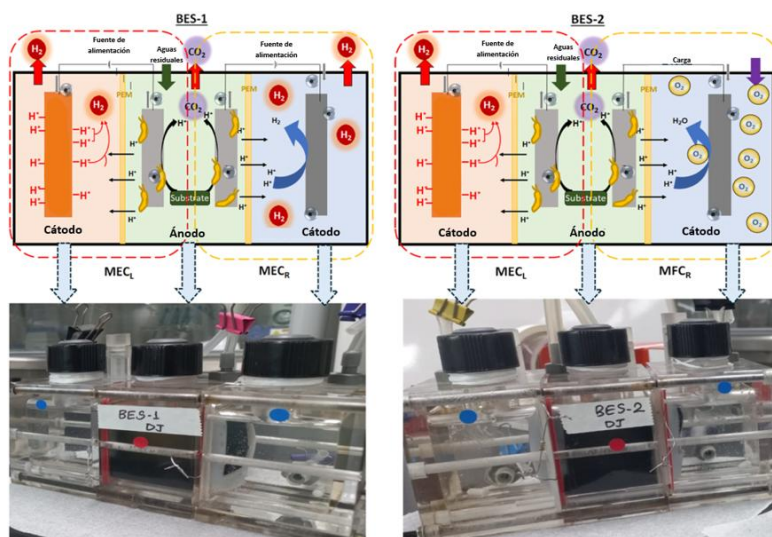


Comparando las tres configuraciones de una, dos y tres cámaras se evidencian diferencias significativas en eficiencia, escalabilidad y aplicabilidad. La celda de dos cámaras con cátodo de espuma de níquel mostró el mayor rendimiento de producción de hidrógeno ($19.07 \text{ L/m}^2 \cdot \text{día}$), validándose a escala piloto como opción viable para aplicaciones industriales, aunque con un costo elevado de materiales. En contraste, la celda de tres cámaras (BES-1) alcanzó un balance superior entre producción de hidrógeno y tratamiento de aguas residuales, con remoción de DQO del 82.3% y producción de H_2 mejorada respecto a MECs tradicionales, lo que sugiere un alto potencial para aplicaciones sostenibles integradas. Aunque el sistema BES-2 evaluado en Jadhav et al. (2024) presenta una baja eficiencia de producción de hidrogeno dentro de las configuraciones aquí contempladas, la incorporación de una MFC cuya electricidad generada es utilizada en la MEC de este mismo sistema para la reducción de hidrógeno, da pie a la posibilidad de reducir o eliminar el potencial externo aplicado en la MEC.

Figura 6.

Representación esquemática y montaje experimental de BEF-1 (integración MEC-MEC) y BES-

2 (integración MEC-MFC). Adaptado de Biohydrogen upgradation and wastewater treatment in 3-chambered bioelectrochemical system assisted with H₂/O₂-based redox reactions. (p. 03) por (Jadhav et al., 2024).



4. Microorganismos

A continuación, se presenta una síntesis comparativa de los principales microorganismos electroactivos estudiados, incluyendo el tipo de material utilizado, sus ventajas, limitaciones y el documento en el que fueron reportados.

Tabla 2.

Tabla comparativa de los principales microorganismos electroactivos estudiados.

Microorganismos	Material	Ventajas	Desventajas	Características	Referencias
Geobacter sulfurreducens	Carbono grafito, malla de acero, criogeles	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia en DET - Forma biopelículas conductoras - Recuperación tras inanición 	Sensible a condiciones extremas (salinidad, toxinas)	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad adaptativa bajo inanición - Activa rutas genéticas de supervivencia - Excelente desempeño en MECs 	(Guan et al., 2025)

Microorganismos	Material	Ventajas	Desventajas	Características	Referencias
Shewanella oneidensis	Ánodo fotoactivo CuO/ZnO/CuO	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de usar DET - Adaptable a condiciones de bajo contacto electrodo-bacteria 	Menor densidad de corriente comparada con Geobacter si no se estimula externa	<ul style="list-style-type: none"> - Versatilidad metabólica - Útil en sistemas híbridos como BPEC. - Sinergia con energía sola 	(Matsuo et al., 2025)
Lysinibacillus sphaericus	Electrodos textiles recubiertos con PEDOT:PSS	<ul style="list-style-type: none"> - Buena adhesión - Alta potencia (367 mW/m²) - Ideal para sistemas flexibles 	Requiere soporte conductor por carecer de citocromos externos	<ul style="list-style-type: none"> - Gram-positiva con capacidad electrogénica. - Excelente rendimiento sobre materiales flexibles. - Promueve sostenibilidad del diseño 	(Kandpal et al., 2025)
Paenibacillus profundus	Superficies modificadas para promover biopelículas (no especificadas en detalle)	Gram-positiva con comportamiento electroactivo funcional en sistemas optimizados	<ul style="list-style-type: none"> - Escasamente estudiada. - Crecimiento condicionado 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia emergente en BES. - Destaca por su adaptación cuando se usan electrodos adecuados 	(Kandpal et al., 2025)
Consortios mixtos (aguas residuales reales)	Criogeles, biochar, mallas, espumas metálicas, textiles conductores	<ul style="list-style-type: none"> - Diversidad metabólica. - Adaptación a residuos reales como orina. - Mayor tolerancia a condiciones variables 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil control sobre la comunidad microbiana. - Rendimiento menos predecible 	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de corriente con orina. - Aplicación práctica en contextos descentralizados 	(Prudente, 2023)

En los últimos años, los microorganismos electroactivos *EAMs* (por sus siglas en inglés, *Electroactive Microorganisms*) han capturado la atención de la comunidad científica como una alternativa sostenible y versátil para aplicaciones energéticas en sistemas bioelectroquímicos (BES). Su capacidad para transferir electrones hacia o desde electrodos externos los convierte en actores clave en tecnologías emergentes como las celdas de electrólisis microbiana (MEC), celdas de combustible microbianas (MFC) y celdas de electrosíntesis microbiana (MES).

En el campo de los sistemas bioelectroquímicos, los microorganismos electroactivos han demostrado ser elementos fundamentales para la conversión de materia orgánica en energía. Su diversidad, tanto estructural como metabólica, influye directamente en el rendimiento del sistema, ya que cada especie presenta mecanismos distintos para interactuar con los electrodos. Uno de los microorganismos más representativos es *Geobacter sulfurreducens*, ampliamente estudiado por su capacidad de formar biopelículas densas y conductoras. Esta bacteria sobresale por su habilidad para realizar transferencia directa de electrones (DET) a través de estructuras especializadas como nanocables y citocromos tipo c, lo que le permite mantener un contacto estrecho y eficiente con los electrodos (Guan et al., 2025).

Lo más destacable de *Geobacter* no es solo su eficiencia en condiciones óptimas, sino también su capacidad de adaptación en escenarios menos controlados. Estudios recientes han evidenciado que esta especie puede mantener su actividad electroquímica incluso después de largos periodos sin suministro de nutrientes, lo cual es altamente relevante en contextos reales donde las fluctuaciones del sustrato son inevitables. Esta capacidad de adaptación metabólica, confirmada mediante análisis transcriptómicos, posiciona a *Geobacter* como una opción sólida para aplicaciones a gran escala, especialmente en sistemas como las celdas de electrólisis microbiana (MEC), donde ha mostrado una densidad de corriente destacable (Guan et al., 2025)

Por su parte, *Shewanella oneidensis* representa otra especie modelo dentro de las bacterias Gram-negativas utilizadas en bioelectroquímica. A diferencia de *Geobacter*, que se caracteriza principalmente por la DET, *Shewanella* tiene la capacidad de alternar entre mecanismos directos y mediados, lo que le permite adaptarse a diferentes condiciones de operación. Un ejemplo de ello es el trabajo desarrollado por Matsuo. (2025) donde se integró esta bacteria con un ánodo fotoactivo CuO/ZnO/CuO en una celda biofotoelectroquímica, logrando duplicar la producción de

hidrógeno bajo luz visible. Esta combinación de procesos biológicos y fotoquímicos refleja una tendencia prometedora hacia sistemas híbridos más eficientes y sostenibles.

Aunque históricamente se ha subestimado el potencial de las bacterias Gram-positivas en aplicaciones bioelectroquímicas, estudios recientes han comenzado a desafiar esta percepción. A diferencia de las Gram-negativas, estas especies carecen de una membrana externa rica en citocromos tipo c, lo que en teoría limitaría su capacidad de transferencia directa de electrones. Sin embargo, se ha demostrado que, bajo condiciones adecuadas, algunas de ellas son capaces de formar biopelículas electroactivas funcionales. Tal es el caso de *Paenibacillus profundus* y *Lysinibacillus sphaericus*, cuyos rendimientos han superado las expectativas iniciales cuando se emplean superficies diseñadas específicamente para favorecer la adhesión y actividad bacteriana (Kandpal et al., 2025).

El estudio desarrollado por (Kandpal et al., 2025) resalta este potencial al demostrar que *L. sphaericus*, cultivada sobre electrodos textiles flexibles recubiertos con PEDOT:PSS, alcanzó una densidad de potencia de hasta 367 mW/m². Este valor no solo resulta competitivo frente a sistemas basados en bacterias Gram-negativas, sino que además muestra una ventaja en términos de diseño, ya que los electrodos flexibles permiten adaptabilidad geométrica, reducción de costos y mejor integración en aplicaciones descentralizadas. Estos hallazgos abren nuevas líneas de investigación orientadas a la sostenibilidad del sistema, donde la selección de microorganismos y materiales se hace pensando en condiciones reales de operación.

El desempeño de los microorganismos electroactivos en sistemas bioelectroquímicos no solo depende de su especie o del tipo de celda utilizada, sino también del entorno en el que se desarrollan. Parámetros como la salinidad o la disponibilidad de nutrientes influyen directamente sobre la formación de biopelículas y la eficiencia del sistema. En un estudio realizado por

Castellano-Hinojosa. (2025), se observó que concentraciones moderadas de NaCl favorecen el crecimiento microbiano y mejoran la transferencia de electrones. Sin embargo, cuando la salinidad supera ciertos límites, los efectos se vuelven inhibitorios, disminuyendo tanto la actividad metabólica como la estabilidad de las biopelículas.

A esta línea de análisis se suma la investigación de Guan. (2025) donde se estudió la respuesta de *Geobacter sulfurreducens* ante condiciones de inanición de nutrientes. Los resultados revelaron una notable capacidad de recuperación de la actividad electroquímica una vez restablecido el sustrato, acompañada por la activación de rutas genéticas vinculadas a la supervivencia. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar la adaptabilidad de los EAMs frente a las fluctuaciones operativas, algo crucial para su implementación en entornos reales, donde las condiciones son menos controladas que en laboratorio.

Además del entorno químico, se han explorado estímulos físicos para potenciar el establecimiento y la eficiencia de las biopelículas. Park. (2025) desarrollaron un método que combina campos magnéticos con medios derivados de biochar, logrando incrementar hasta en un 80 % la producción de hidrógeno en celdas de electrólisis microbiana. Esta técnica, basada en la manipulación del entorno físico sin alterar genéticamente a las bacterias, demuestra cómo la bioingeniería y la física aplicada pueden converger para optimizar el rendimiento microbiano mediante intervenciones externas simples pero efectivas.

Otro factor determinante en el rendimiento de los BES es el material de los electrodos. Investigaciones como las de Cercado Quezada. (2016) y Prudente. (2023) destacan la utilidad de materiales no convencionales como criogeles, espumas metálicas y textiles funcionalizados que ofrecen alta porosidad, buena conductividad y gran compatibilidad con las biopelículas. La elección de estos soportes no solo mejora la eficiencia electroquímica, sino que también permite

trabajar con sustratos económicos y accesibles como la orina o aguas residuales, facilitando la implementación de estas tecnologías en zonas rurales o de bajos recursos.

Precisamente, el estudio de (Prudente, 2023) demuestra cómo la orina, aun con su composición variable y compleja, puede ser utilizada de forma efectiva como sustrato en celdas bioelectroquímicas, siempre que se empleen materiales adecuados que favorezcan el desarrollo bacteriano. Este tipo de aplicaciones no solo amplía el abanico de recursos aprovechables, sino que también evidencia la importancia de diseñar sistemas capaces de operar bajo condiciones no ideales, adaptándose a residuos reales en contextos descentralizados.

Finalmente, la integración de microorganismos electroactivos en configuraciones híbridas, como los biorreactores anaerobios de membrana acoplados a sistemas bioelectroquímicos (AnMBR-BES), representa una estrategia prometedora para abordar simultáneamente el tratamiento de aguas residuales y la producción de energía. J. Wang, (2024) reportaron una mejora significativa en la remoción de DQO y una reducción del ensuciamiento de membranas en estos sistemas, lo que refuerza su viabilidad como solución integral para problemáticas ambientales contemporáneas. La clave de estas aplicaciones exitosas radica en la interacción armónica entre microorganismo, entorno y diseño de celda.

5. Electrodo en sistemas BEH

Los electrodos son clasificados según su función en ánodo o cátodo los cuales funcionan como puente entre la actividad microbiana y la conversión electroquímica de energía.

5.1. Ánodos

El ánodo cumple la tarea de recibir los electrones liberados por la actividad metabólica de las bacterias electroactivas, su desempeño está ligado a la capacidad para interactuar con los microorganismos, su conductividad eléctrica y durabilidad. Algunos de los artículos analizados

presentan ánodos utilizados en celdas microbiana de combustible (MFC), aunque no se enfocan en celdas de electrolisis microbiana (MEC), en los sistemas MFC y MEC el ánodo cumple las mismas funciones y posee las mismas propiedades. Por lo cual, es correcto analizar aquellos artículos que presenten estudios de materiales anódicos en sistemas MFC.

5.1.1. Materiales convencionales en ánodos

Durante décadas, materiales como la tela de carbono y el papel de carbono han sido los materiales más utilizados, aunque carecen de propiedades avanzadas, se destacan por su disponibilidad y estabilidad. Los materiales convencionales rara vez son protagonistas en los estudios recientes, pero su papel comparativo es esencial para demostrar el impacto real de los nuevos materiales y también conforman la base para desarrollar nuevos ánodos. Lo anterior se ve reflejado en (He et al., 2025) donde el papel de carbono sin dopar (CPANF) mostró una potencia de salida 4.5 veces menor que el ánodo dopado con hierro (CNF-1). De forma similar Fang. (2024) evidenció que el papel de carbono sin tratamiento presenta escasas propiedades microbianas y conductoras en comparación con el papel de carbono recubierto de óxido de grafeno (GO) y polianilina (PANI). Siguiendo esta misma tendencia, ambos estudios emplearon el papel y tela de carbono bajo esta misma temática comparativa.

5.1.2. Materiales avanzados y modificaciones novedosas

El desarrollo de ánodos avanzados ha sido una de las áreas de investigación más dinámicas centrándose en la mejora de la conductividad eléctrica y la biocompatibilidad con microorganismos. Estas dos propiedades son la base de la mayoría de las investigaciones las cuales mediante la modificación química y configuración morfológica se busca encontrar nuevos materiales avanzados. A continuación, se enfatizan los materiales avanzados junto con estas dos propiedades ya mencionadas.

5.1.2.1. Conductividad. Los metales poseen una alta conductividad y su aplicación en ánodos es uno de los enfoques más recurrentes en la literatura actual incorporando metales de transición o sus óxidos como agentes dopantes. Ejemplos notables incluyen el dopaje con $\text{Fe}_3\text{C}/\text{Fe}$ en carbono poroso (S. Wang et al., 2025) y la modificación de nanofibras de carbono con hierro mediante electrospinning (He et al., 2025). Además, el uso de óxidos como CuO/ZnO destaca por combinar propiedades fotocatalíticas y conductoras (Matsuo et al., 2025).

5.1.2.2. Biocompatibilidad. Los microorganismos electroactivos son selectivos al interactuar con materiales, priorizando las superficies que ofrecen condiciones óptimas para su adhesión y desarrollo. Esta selectividad ha impulsado investigaciones a desarrollar ánodos capaces de ofrecer microambientes estructural favorables. Las modificaciones en la superficie del ánodo y el uso de estructuras porosas o tridimensionales son las principales estrategias estudiadas actualmente, como demostraron (Fang et al., 2024) y (He et al., 2025) los cuales mejoraron la adherencia microbiana gracias a estas estrategias para optimizar la biointerfaz anódica.

Algo muy interesante se menciona en (Park et al., 2025) quienes emplearon un material magnético a partir de cáscara de cangrejo carbonizada, tratada con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ junto con un campo magnético alternante para inducir la organización tridimensional del biofilm. Este enfoque permitió mejorar la adhesión bacteriana y la eficiencia en la transferencia electrónica directa. La interacción sinérgica entre el estímulo físico externo y la modificación funcional del ánodo consolidó una interfaz bioelectroquímica más activa y estable, evidenciando el potencial de las estrategias de estructuración dirigida como vía emergente para el diseño de ánodos biointeligentes.

La tabla 3 presenta información importante referente a todos los ánodos estudiados por los artículos científicos mencionados. Esta tabla permite evidenciar claramente los biomateriales y compuestos metálicos incorporados en los ánodos estudiados.

Tabla 3.*Síntesis de información sobre los ánodos estudiados.*

Referencia	Material del ánodo	Ventajas	Desventajas	Características claves
He et al., 2025	Fibras de carbono dopadas con hierro (ferroceno + PAN)	Alta transferencia electrónica, biocompatibilidad, gran formación de biofilm.	Exceso de Fe reduce rendimiento, Fe no superficial detectable	Diámetro óptimo de fibra, estructura gráfica, superficie rugosa, 1296 mW/m ² potencia máx.
Fang et al., 2024	Óxido de grafeno y polianilina sobre papel de carbono	Biofilm denso, transferencia bidireccional, alta eficiencia, reducción de nitrato	Proceso de fabricación complejo	Interacción química directa con citocromos, 477.5 mW/m ² potencia, 1950 mA/m ² corriente
S. Wang et al., 2025	Carbono poroso 3D con nanopartículas de Fe ₃ C/Fe	Alta superficie, baja Rct, excelente estabilidad	Exceso de Fe colapsa estructura, requiere síntesis controlada	Estructura jerárquica y 4.90 W/m ² potencia
Matsuo et al., 2025	Nanohilos y nanopartículas de CuO y ZnO en estructura trilaminar	Alta absorción de luz, sin lixiviación de Cu ²⁺ , buena biocompatibilidad, fotocorriente estable	Producción de H ₂ variable, menor área superficial, bajo rendimiento comparado con otros	Absorción 73.4% visible, 13.6 mmol/m ² /día H ₂ , sin inhibir bacterias

5.1.2.3. Bioánodos especiales. En una propuesta sumamente innovadora Zhang. (2021) presenta un ánodo enzimático trifásico diseñado para reemplazar la oxidación del agua (OER) por una reacción biocatalítica más eficiente. Este bioánodo se construyó utilizando una tela de carbono superhidrofóbica como soporte conductor, sobre la cual se inmovilizó la enzima glucosa oxidasa (GOx) mediante una matriz de quitosano, conformando así una fase líquida reactiva. La función catalítica de la GOx consiste en la oxidación de glucosa a ácido glucónico, proceso que libera peróxido de hidrógeno (H₂O₂) como subproducto. Para completar la cascada, se integraron nanopartículas de platino (Pt) en la interfase, las cuales catalizan la descomposición del H₂O₂ generando electrones que fluyen hacia el circuito externo. Esta configuración trifásica (sólido-líquido-gas) permite una transferencia electrónica altamente eficiente y estable, al tiempo que evita

la generación de oxígeno en el ánodo, reduciendo el voltaje requerido para la producción de hidrógeno en el cátodo.

5.2. Cátodos

El cátodo en esencia tiene la función de reducir protones (H^+) para formar hidrógeno molecular (H_2), utilizando los electrones generados por la actividad metabólica de los microorganismos en el ánodo mediante la siguiente reacción:



Los cátodos y los catalizadores están estrechamente relacionados en los sistemas electroquímicos por lo cual pueden surgir confusiones en su distinción conceptual y resulta fundamental diferenciar con claridad estos dos términos. El cátodo se refiere a la base estructural del electrodo la cual esta generalmente constituida por un material compuesto o un elemento puro y cumple la función principal es recibir los electrones provenientes del ánodo, impulsados por la aplicación de un voltaje externo. Por otro lado, los catalizadores son materiales que se adicionan o integran a esta base estructural del cátodo, con el propósito de facilitar cinéticamente la reacción de reducción, como en el caso específico de la evolución de hidrógeno (Sikarwar et al., 2025).

5.2.1. Cátodos convencionales

Al igual que en la sección de ánodos, los cátodos convencionales están fabricados con tela de carbono, papel de grafito o fibras de carbono. Estos materiales a base de carbono han sido usados durante años debido a su estabilidad química y bajo costo. A pesar de que estos cátodos no tienen la capacidad de promover eficientemente la reacción de evolución de hidrogeno (HER), aún se aplican en investigaciones recientes. La tabla 4 presenta los cátodos que se implementan en las investigaciones que se contemplan en esta sección, mediante esta tabla se evidencia que estos materiales catódicos convencionales se encuentran en más de la mitad de los artículos científicos

presentados. Casos como los presentados en (He et al., 2025) y (Keruthiga et al., 2021) aún implementan el uso de cátodos de tela de carbono y fibra de carbono a pesar de ser artículos publicados en el año 2021 y 2025 respectivamente. Esto sucede debido a que su enfoque se encuentra en los materiales del ánodo, por lo cual implementan estos cátodos sencillos aprovechando su estabilidad y economía.

A partir de la tabla 4 se puede analizar que estos materiales catalíticos convencionales son utilizados ampliamente como material base para ser modificados mediante la adición de catalizadores que mejoran sus propiedades.

Tabla 4.

Materiales de cátodos presentes en la literatura

Artículos	Materiales del cátodo
(Hu et al., 2024)	Tela de carbono sin modificar
	Tela de carbono + Pt
(Keruthiga et al., 2021)	Tela de carbono sin modificar
(Hubenova et al., 2022)	Papel de grafito sin modificar
	Papel de grafito + Pt
(Matsuo et al., 2025)	Alambre de Pt
(He et al., 2025)	Fibra de carbono sin modificar
(Guerrero-Sodric et al., 2024)	acero inoxidable
	Ni-Foam
(Jayabalan et al., 2020)	Ni-Foam
	Ni-Foam + oxido de níquel y oxido de grafeno
	Ni-Foam + Oxido de cobalto

5.2.2. *Cátodos alternativos*

Jayabalan (2020) implementó tres tipos de cátodos fabricados en base espuma de níquel. Este material tiene una conductividad alta y presenta una estructura porosa que incrementa la superficie activa disponible para la reducción de protones (H^+) aumentando su eficiencia de producción de hidrogeno. Este estudio comparó tres cátodos los cuales dos de ellos fueron modificados con oxido de níquel, oxido de grafeno y oxido de cobalto (tabla 4). De forma similar a los materiales convencionales, la espuma de níquel presenta una versatilidad para ser modificada con catalizadores presentando mejores propiedades.

Guerrero-Sodric (2024) también implementa un cátodo de espuma de níquel el cual se compara de manera directa con un cátodo de acero inoxidable. Estos dos materiales fueron evaluados a escala piloto en celdas de electrólisis microbiana. El cátodo de Ni-foam alcanzó una eficiencia de $19.07 \text{ L H}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. En contraste, el acero inoxidable logró $7.72 \text{ L H}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. No obstante, el costo del Ni-Foam (119 €) supera ampliamente al del SS (4 €). La diferencia entre eficiencia y costo de estos dos cátodos es muy evidente, lo cual permite que cada material se adapte a diversas aplicaciones donde la eficiencia energética sea la prioridad o donde se desee un material más económico, pero a su vez con una eficiencia aceptable.

6. Electrocatalizadores

En la presente revisión se identificaron distintos tipos de electrocatalizadores aplicados en sistemas bioelectroquímicos, con propiedades, desempeños y niveles de innovación muy variados. Si bien todos representan aportes valiosos dentro del campo, no todos ofrecen el mismo grado de relevancia tecnológica o impacto sobre la eficiencia de producción de hidrógeno.

Tabla 5.

Tabla comparativa sobre los electrocatalizadores estudiados.

Electro-catalizadores	Material	Ventajas	Desventajas	Características	Referencias
Bioinspirados (catalizadores/ biohíbridos)	Microorganismos electroactivos (EAM) Geobacter sulfurreducens, Shewanella oneidensis	- Bajo costo - Sostenibilidad biológica - Capacidad de regeneración natural	- Baja densidad de corriente - Estabilidad limitada - Alta dependencia de condiciones ambientales	- Transferencia directa o indirecta de electrones - Capacidad para sintetizar metales in situ o actuar directamente como catalizadores HER/OER	(Bajracharya et al., 2024)
Carbono poroso 3D con nanopartículas de Fe ₃ C/Fe	Estructura de carbono activado con nanopartículas de Fe ₃ C y Fe embebidas insitu	- Alta porosidad. - Buena conductividad - Excelente interacción batería electrodo - Económica	Aplicación limitada al ánodo (no actúa como catalizador HER directamente)	- Mejora la transferencia de carga MFCs - Buena biocompatibilidad - Potencial para escalarse	(S. Wang et al., 2025)
NiO.rGO y Co ₃ O ₄ .Rgo sobre espuma de Níquel	Nanocompuestos de óxidos metálicos (NiO y Co ₃ O ₄) sobre óxido de grafeno reducido (rGO) y recubiertos sobre NiFoam	- Alta eficiencia en HER - Materiales abundantes - Buena estabilidad electroquímica	- Co ₃ O ₄ presenta menor rendimiento que NiO - Fabricación conlleva más pasos	- NiO.rGO alcanzó 4.38 mmol/L/día de H ₂ - CE de 56.6% - Buena sinergia catalítica entre el metal y el grafeno	(Jayabalan et al., 2020)
MoS ₂ sobre nanocarbono	Disulfuro de molibdeno (MoS ₂) depositado sobre nanocarbono, aplicado sobre NiFoam	- Buena actividad HER - No necesita metales nobles - Aplicable con orina como sustrato	- Puede requerir condiciones controladas para mantener la eficiencia - Sensibilidad a contaminación orgánica	- Catalizador estable - Rendimiento aceptable - Integra tratamiento de residuos con producción energética	(Hwang et al., 2022)

Electro-catalizadores	Material	Ventajas	Desventajas	Características	Referencias
Biocátodos	Microorganismos electroactivos (células vivas formando biopelícula sobre el electrodo catódico)	- Sin uso de metales - Regeneración natural - Ideal para sistemas descentralizados	- Baja eficiencia comparativa - Difícil control y reproducibilidad	- Catalizador biológico en condiciones anaerobias estrictas - Depende del microbiota dominante	(Noori et al., 2024)
Foto-asistido	Heterounión semiconductor de ZnFe ₂ O ₄ con g-C ₃ N ₄ sobre fieltro de grafito	- Aprovechamiento de luz solar - Alta eficiencia energética (>200%) - Buena actividad fotocatalítica	- Requiere fuente de luz constante - Costos moderados - Sensibilidad al tipo de residuo	- Producción de H ₂ de 0.55 m ³ /m ³ /día - Eficiencia solar a H ₂ del 6.7% - Tratamiento simultáneo de metales y orgánicos	(Huang et al., 2023)

El catalizador que demostró el mejor equilibrio entre rendimiento, viabilidad y bajo costo fue el compuesto de NiO.rGO soportado sobre espuma de níquel (Jayabalan et al., 2020). Esta formulación alcanzó una tasa de producción de hidrógeno de 4.38 mmol/L/día y una ‘eficiencia coulombica del 56.6%, utilizando aguas residuales industriales como sustrato. Lo que hace destacar a este catalizador es su composición basada en níquel, un metal abundante, combinado con grafito reducido, que mejora tanto la conductividad eléctrica como la estabilidad del sistema. El recubrimiento sobre espuma de níquel proporciona una interfaz tridimensional porosa y altamente activa, lo que facilita la reacción de evolución de hidrógeno sin recurrir a metales nobles. Desde una perspectiva metalúrgica, el comportamiento electroquímico del NiO.rGO lo posiciona como una de las opciones más robustas y adaptables dentro de los sistemas MEC.

Otro sistema que merece especial atención es el cátodo foto-asistido ZnFe₂O₄/g-C₃N₄ (Huang et al., 2023). Su relevancia no solo radica en su capacidad para remover contaminantes metálicos y orgánicos del efluente, sino también en que logró una eficiencia eléctrica del 204% y

una eficiencia solar a hidrógeno del 6.7%. Esta aparente eficiencia superior al 100% se debe a que el cátodo aprovecha directamente la luz solar para generar portadores de carga (electrones y huecos) que impulsan la reacción HER, disminuyendo así la necesidad de energía eléctrica externa. La heterounión semiconductor entre ZnFe_2O_4 y $\text{g-C}_3\text{N}_4$ facilita esta respuesta fotoelectroquímica, permitiendo un rendimiento energético netamente positivo. Aunque este tipo de sistemas requiere condiciones específicas de iluminación, representa una ruta prometedora hacia la integración de energías renovables en la producción de hidrógeno.

En cuanto a soluciones aplicables en contextos descentralizados, el uso de MoS_2 sobre nanocarbono (Hwang et al., 2022) demostró ser una alternativa eficaz. Su aplicación con orina humana como sustrato evidencia su tolerancia a matrices contaminadas y su potencial en entornos comunitarios. MoS_2 actúa como catalizador para la reacción HER y, aunque no se reportaron todos los indicadores cuantitativos, el enfoque destaca por su sencillez, bajo costo y aplicabilidad en zonas rurales o sin acceso a infraestructura para tratamiento de agua. La sinergia entre MoS_2 y el nanocarbono mejora la estabilidad y la conductividad del sistema, posicionándolo como una opción viable dentro de estrategias de economía circular.

Por otra parte, desde un enfoque biohíbrido, el uso de microorganismos como *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis* para sintetizar metales como Fe, Pd, Ir, Au, Pt, Cu y Ni (Bajracharya et al., 2024). Estos microorganismos tienen la capacidad de reducir iones metálicos en condiciones suaves, generando nanopartículas, clústeres atómicos o incluso óxidos metálicos sobre distintos soportes. Este proceso se basa en su mecanismo de transferencia extracelular de electrones (EET), lo que permite la reducción biológica de metales a su estado elemental. Este tipo de catalizadores destaca por su bajo impacto ambiental, su capacidad de regeneración y su

compatibilidad con sistemas biológicos, aunque aún enfrenta desafíos importantes en cuanto a reproducibilidad, control del proceso y escalabilidad industrial.

Finalmente, el uso de biocátodos como electrocatalizadores vivos se presenta como una alternativa con un enfoque fuertemente ecológica (Noori et al., 2024). Sin necesidad de metales ni materiales sintéticos, los biocátodos se forman a partir de bacterias electroactivas que actúan como catalizadores naturales en la reducción de protones. Aunque esta alternativa representa una vía interesante hacia la sostenibilidad, su eficiencia electroquímica limitada y su alta dependencia de condiciones anaerobias estrictas restringen su aplicación en sistemas de mayor escala.

7. Condiciones Operativas

El desempeño de los sistemas bioelectroquímicos (BES) está fuertemente condicionado por variables operativas como la salinidad, el pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y el modo de operación. Estas variables no solo afectan la eficiencia de remoción de contaminantes, sino también la actividad electroactiva de los microorganismos responsables de la generación de electricidad o la producción de biocombustibles como el hidrógeno y el metano. Comprender cómo se comportan estas condiciones en sistemas reales permite establecer criterios de diseño y control para su aplicación práctica a escala industrial.

7.1. Efectos del pH

El pH es una de las variables más críticas en la operación de sistemas bioelectroquímicos, ya que incide directamente en el comportamiento tanto de los microorganismos como de las reacciones electroquímicas que permiten la generación de energía o la producción de compuestos valiosos como el hidrógeno. A nivel microbiológico, el pH condiciona la integridad de las membranas celulares, la disponibilidad de nutrientes esenciales y la eficiencia de la transferencia extracelular de electrones. Por ejemplo, en condiciones demasiado ácidas, se puede inhibir el

crecimiento de bacterias electroactivas y afectar su metabolismo; mientras que, en medios alcalinos, se corre el riesgo de precipitación de sales y reducción de la solubilidad de ciertos compuestos, lo cual compromete la conductividad del sistema y reduce su eficiencia global.

Por esta razón, establecer un rango de pH óptimo no es una tarea secundaria, sino una decisión operativa fundamental. La mayoría de los estudios reportan que valores ligeramente ácidos, entre 5.5 y 6.5, favorecen la actividad de comunidades electroactivas y la evolución de hidrógeno en el cátodo, especialmente en sistemas MEC. Este comportamiento se ha confirmado en distintos escenarios, donde el ajuste del pH permitió mejorar significativamente la eficiencia de conversión energética y la estabilidad del proceso (Faruk Kilicaslan & Dincer, 2025). Así mismo, se ha observado que trabajar en este rango reduce el riesgo de formación de compuestos inhibidores y promueve una interacción más favorable entre el biofilm microbiano y la superficie del electrodo. En consecuencia, el pH debe ser monitoreado de manera continua y considerado como un parámetro dinámico, capaz de determinar el éxito o el fracaso de la operación bioelectroquímica.

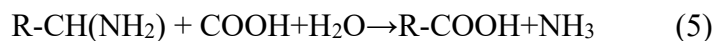
La influencia del pH sobre el equilibrio del sistema también está vinculada con otras variables como la temperatura, lo que obliga a considerar su comportamiento dentro de un entorno operativo integrado.

7.2. Efecto de la temperatura

La temperatura, al igual que el pH, es una variable fundamental en el desempeño de los sistemas bioelectroquímicos, ya que regula tanto la velocidad de las reacciones redox como la actividad metabólica de los microorganismos electroactivos. Operar estos sistemas dentro de un rango mesófilo, generalmente entre 30 y 40 °C, permite mantener un equilibrio funcional que favorece tanto la transferencia de electrones como la generación de productos de valor agregado,

como el hidrógeno o el metano. A temperaturas demasiado elevadas, muchas enzimas esenciales para la respiración extracelular comienzan a desnaturalizarse, reduciendo la eficiencia del sistema. Por el contrario, cuando la temperatura es baja, los procesos bioquímicos se ralentizan, lo cual afecta directamente la producción de corriente o gases, dependiendo del tipo de celda.

Estudios recientes han confirmado que temperaturas cercanas a los 40 °C suelen ser óptimas para maximizar la producción de biohidrógeno, sin comprometer la estabilidad de la biopelícula ni aumentar el consumo energético del sistema (Faruk Kilicaslan & Dincer, 2025). Además, operar dentro de este rango ayuda a reducir la formación de compuestos inhibidores como el amoníaco libre o ácidos orgánicos volátiles, por ejemplo, en el artículo "Investigación experimental de sistemas integrados para la producción de biohidrógeno y biometano", se emplearon estiércol de vaca y hojas de álamo como sustratos, ambos ricos en compuestos nitrogenados y polisacáridos estructurales. Durante la digestión anaerobia, la materia nitrogenada se desamina, generando iones amonio (NH_4^+), los cuales, a temperaturas entre 40 y 50 °C y en condiciones de pH elevado, pueden transformarse en amoníaco libre (NH_3), compuesto tóxico para muchas bacterias electroactivas Ecuación de desanimación:



Paralelamente, la hidrólisis de celulosa y hemicelulosa libera azúcares fermentables, que bajo condiciones acidogénicas producen ácidos orgánicos volátiles como el acético, los cuales pueden acumularse e inhibir la actividad microbiana si no son rápidamente consumidos (Ecuación de fermentación:



Lo que favorece la continuidad del proceso, especialmente en configuraciones integradas. Por lo tanto, el control térmico no solo debe pensarse como una condición física de operación, sino

como una herramienta estratégica para garantizar el rendimiento sostenido del sistema. Las reacciones (5) y (6) son representativas basadas en los principios bioquímicos.

Otra variable que se encuentra estrechamente relacionada con la temperatura es la salinidad del medio, la cual puede amplificar o atenuar sus efectos dependiendo de la adaptabilidad microbiana.

7.3. Efecto de la salinidad

La salinidad del medio influye notablemente en el comportamiento de los sistemas bioelectroquímicos, tanto a nivel electroquímico como microbiológico. Por un lado, una salinidad adecuada mejora la conductividad del electrolito, facilitando el movimiento de iones y disminuyendo la resistencia interna del sistema. Esto puede traducirse en una mayor eficiencia de transferencia de carga entre los electrodos. Sin embargo, este beneficio tiene un límite. A concentraciones elevadas, las sales pueden ejercer presión osmótica sobre las células, afectando la integridad de sus membranas y reduciendo su actividad metabólica. Este efecto puede comprometer seriamente la eficiencia del sistema, especialmente cuando se trabaja con comunidades microbianas no adaptadas a condiciones salinas.

A nivel comunitario, se ha observado que niveles bajos o moderados de salinidad tienden a favorecer la diversidad microbiana y la presencia de géneros electroactivos relevantes. Por ejemplo, concentraciones cercanas a 3.5 g/L de NaCl se han asociado con una mayor abundancia de microorganismos capaces de realizar transferencia extracelular de electrones, lo cual se refleja en una mayor generación de corriente y mejor remoción de materia orgánica (Castellano-Hinojosa et al., 2025). Estos resultados refuerzan la importancia de considerar la salinidad no como un parámetro fijo, sino como una variable que debe ser ajustada en función del tipo de sustrato, el objetivo del sistema y la tolerancia de la comunidad microbiana involucrada.

Este tipo de tolerancia también cobra relevancia en escenarios donde las condiciones de nutrientes no son constantes, como sucede frecuentemente en aplicaciones con aguas residuales reales.

7.4. Efecto de la inanición de nutrientes

La operación de sistemas bioelectroquímicos con aguas residuales reales implica enfrentarse a condiciones variables, donde la disponibilidad de nutrientes puede disminuir abruptamente debido a cambios en la carga orgánica o interrupciones en el flujo. Estos periodos de inanición representan un reto importante para la estabilidad del sistema, ya que la falta de nutrientes puede reducir la actividad electroactiva de las biopelículas y afectar la producción de corriente o de gases. Sin embargo, muchas comunidades microbianas desarrollan estrategias de adaptación para sobrevivir a estas condiciones, incluyendo la activación de rutas metabólicas alternativas, el almacenamiento de compuestos energéticos o la reorganización de la estructura del biofilm.

Se ha documentado que ciertos géneros, como *Geobacter*, son particularmente resilientes frente a la falta de nutrientes y son capaces de recuperar su actividad electroquímica una vez se restablece el suministro de materia orgánica (Guan et al., 2025). Esta capacidad de respuesta no solo garantiza la recuperación del rendimiento del sistema, sino que también demuestra el potencial de operar BES en condiciones no ideales sin comprometer su funcionalidad a largo plazo. Por esta razón, entender y anticipar la respuesta microbiana ante la inanición es fundamental al diseñar estrategias de operación intermitente o en regiones donde el flujo de residuos no es constante.

El comportamiento de las biopelículas también depende en gran medida del régimen de alimentación del sistema, lo cual introduce una variable operativa de gran relevancia: el modo de operación.

7.5. Modo de operación: lote vs. Flujo continuo

El modo de operación en un sistema bioelectroquímico no solo define su dinámica interna, sino que condiciona directamente su escalabilidad y eficiencia a largo plazo. En operación por lotes, el sistema trabaja con una carga fija de sustrato durante un tiempo determinado, lo cual permite un mayor control experimental, pero limita la estabilidad del proceso debido a la acumulación de subproductos inhibidores y a la variabilidad de condiciones. Por otro lado, la operación en flujo continuo mantiene una entrada constante de sustrato y una salida proporcional de efluente, lo que ayuda a estabilizar el ambiente interno y favorece la adaptación de las comunidades microbianas.

Comparaciones entre ambos modos han demostrado que, aunque la operación por lotes puede presentar un rendimiento inicial más alto, es el flujo continuo el que asegura una producción más sostenida de energía o biogás, así como una mayor eficiencia energética general (Faruk Kilicaslan & Dincer, 2025). Además, el flujo continuo facilita el escalamiento industrial, ya que reduce la necesidad de intervención manual y minimiza las interrupciones del proceso. Por lo tanto, la elección del modo de operación debe hacerse no solo en función del tipo de estudio, sino también del contexto de aplicación, privilegiando aquellas configuraciones que favorezcan la estabilidad, la continuidad y la adaptación biológica.

Los parámetros operativos analizados determinan en gran medida la estabilidad, eficiencia y resiliencia de los sistemas bioelectroquímicos. Si bien cada variable presenta efectos particulares sobre el sistema, su impacto es aún mayor cuando se considera la interacción entre ellas. Por ello,

el diseño y la operación de celdas bioelectroquímicas deben abordarse desde una perspectiva integral, considerando no solo las condiciones óptimas individuales, sino también su sinergia dentro del entorno biológico y electroquímico. Este enfoque es clave para avanzar hacia aplicaciones reales más robustas, eficientes y sostenibles.

8. Biomasa usada en la producción bioelectroquímica de hidrogeno (BEH)

La biomasa es la fuente primaria de compuestos orgánicos que los microorganismos electroactivos oxidan para generando electrones y protones. La BEH se destaca por el aprovechamiento de residuos como aguas residuales, efluentes anaerobios o materiales lignocelulósicos y de esta manera le da valor a lo que se considera como desechos. La calidad del sustrato influye directamente en el sistema y compuestos de bajo peso molecular como ácidos grasos volátiles o azúcares simples son preferibles por su mayor biodegradabilidad. Caso contrario se presenta con la biomasa compleja las cuales requieren pretratamientos para descomponer estructuras lignocelulósicas y liberar compuestos accesibles añadiendo etapas que pueden afectar costos y escalabilidad del sistema (Cercado Quezada, 2016).

8.1. Orina humana

Aunque la orina humana se considera como desecho, esta biomasa es viable para sistemas bioelectroquímicos gracias a su alta conductividad natural y contenido de compuestos fácilmente oxidables. El estudio presentado en Hwang. (2022) se demostró que en una celda de electrólisis microbiana (MEC) equipada con un cátodo de MoS₂ recubierto con nanocarbono, la orina diluida puede generar hidrógeno con una eficiencia de producción de 0.152 m³ H₂/m²/día y una remoción de NH₃-N del 68.7%, sin necesidad de pretratamiento costoso. Otro estudio que presenta la orina como biomasa es (Prudente, 2023) donde se empleó en celdas de combustible microbianas (MFCs), enfocándose en generar corriente eléctrica. Aunque las MFCs no producen hidrógeno, su

uso con orina permite validar la actividad de bacterias electroactivas y optimizar el diseño de ánodos porosos, además de abrir la posibilidad de integrar este tipo de celdas con las ya conocidas MECs como lo presenta Jadhav (2024).

8.2. Efluentes de digestión anaerobia

Los efluentes líquidos de digestores anaerobios tienen la gran ventaja de ser abundantes en ácidos grasos volátiles y constituyen una fuente útil de materia orgánica para BEH. Faruk Kilicaslan & Dincer (2025) desarrollaron un sistema integrado de digestión anaerobia y MEC sin membrana utilizando hojas de álamo pretratadas y estiércol bovino como sustrato bajo condiciones mesofílicas (40 °C) y pH 6. Este sistema logró la producción simultánea de biohidrógeno y biometano, alcanzando eficiencias energéticas de hasta 63.4% y una notable estabilidad en operación continua.

8.3. Sustratos sintéticos

El uso de sustratos sintéticos permite evaluar con precisión el rendimiento del sistema BEH a nivel de laboratorio teniendo un mejor control del sistema en estudio. Cercado Quezada (2016) comparó diferentes configuraciones de MEC y tipos de electrodos usando medios sintéticos con acetato o butirato donde el mejor desempeño se obtuvo con tela de carbono tratada por anodización. De esta manera se alcanzaron densidades de corriente de hasta 14,800 mA/m². Gracias a estos resultados se demuestra que, en condiciones controladas, los sustratos simples permiten maximizar la producción de hidrógeno y entender mejor los mecanismos de transferencia electrónica.

8.4. Residuos orgánicos diversos

Akram (2024) analizaron diversas biomasas de diferentes procedencias llegando a la conclusión de que el uso de residuos agroindustriales y urbanos representa una alternativa

sostenible de bajo carbono. Es importante saber que la heterogeneidad de compuestos requiere pretratamientos adecuados que pueden implicar mayores costos operativos en algunos casos.

A continuación, en la tabla 7 se presenta un comparativo que resume las principales características de los distintos tipos de biomasa utilizados en la producción bioelectroquímica de hidrógeno (BEH). Estos datos y análisis son en base a los artículos analizados en esta sección.

Tabla 6.

Tabla comparativa de los tipos de biomasa utilizados en la producción bioelectroquímica de hidrógeno (BEH).

Tipo de biomasa	Composición	Pretratamiento	Ventajas	Desventajas	Referencia
Orina humana	Urea, creatinina, NH ₄ ⁺ , sales orgánicas	No	Alta conductividad	Variabilidad fisiológica	(Hwang et al., 2022)
			- No requiere pretratamiento - Fácil recolección	Inhibición posible por alta carga nitrogenada	(Prudente, 2023)
Efluente anaerobio	Ácidos grasos volátiles (acetato, propionato)	Moderado (ácido)	- Valorización de residuos - Producción dual H ₂ /CH ₄ - Estabilidad operativa	- Requiere control de pH y temperatura - Posible acumulación de inhibidores	(Faruk Kilicaslan & Dincer, 2025)
Sustratos sintéticos	Acetato, butirato, glucosa (controlados)	No	- Alta reproducibilidad - Permite estudios electroquímicos precisos	- No representa condiciones reales - No es aplicable en campo	(Cercado Quezada, 2016)
Residuos orgánicos	Celulosa, hemicelulosa, melaza, bagazo, pulpas	Sí (ácido, térmico)	- Abundantes y económicos - Alto potencial energético	- Necesitan pretratamiento - Liberan inhibidores como furfural	(Akram et al., 2024)

9. Desafíos técnicos, económicos y ambientales de la implementación de la BEH

Un proceso tan complejo como lo es la BEH, presenta numerosos desafíos los cuales varían principalmente en la configuración de los sistemas MEC. Cuando se utilizan MEC de una sola cámara uno de los principales problemas es la migración de hidrógeno molecular desde el cátodo al ánodo reduciendo el rendimiento energético del sistema. Si por el contrario se trabaja con varias cámaras, las membranas tradicionales (como PEMs y AEMs), pueden sufrir daños causado por compuestos orgánicos e inorgánicos, deteriora la transferencia iónica y afecta la estabilidad operativa.

La gran mayoría de artículos aquí analizados se enfocan en mejorar las bajas tasas de producción de hidrógeno debido a la limitada transferencia electrónica, alta resistencia interna y escasa interacción microbio-electrodo, este es considerado el principal desafío técnico. Desde el punto de vista microbiológico, la competencia entre microorganismos electroactivos y no electroactivos, la variabilidad en la estabilidad de la biopelícula, y la limitada cinética intracelular son los desafíos que predominan en la optimización de la BEH. La ciencia de materiales aplicados a esta tecnología presenta otros desafíos como la degradación de electrodos, la baja actividad electrocatalítica de materiales económicos y el desequilibrio de pH por acumulación de protones en el ánodo.

Los desafíos económicos de la BEH se encuentran principalmente en los altos costos asociados a los materiales avanzados, aunque se exploran alternativas como la espuma de níquel o acero inoxidable, pero estos aún requieren mejoras en eficiencia y durabilidad. La BEH, al ser una técnica que involucra microorganismos, mantener las condiciones adecuadas es primordial para la eficiencia del sistema, lo anterior eleva los costos de operación al implementar sistemas de agitación, control térmico o pretratamientos de biomasa.

Ambientalmente la BEH no presenta impactos negativos significativos, la mayoría de sus aportes ambientales son positivos. Se podría decir que su principal desafío radica en alcanzar la viabilidad técnica y económica a gran escala para consolidarse como una tecnología líder en producción de hidrógeno.

10. Conclusiones

La eficiencia de los sistemas BEH está estrechamente relacionada con su configuración interna. En particular, la implementación de separadores direccionales de electrodos (DES) en MEC de una sola cámara mejora notablemente el rendimiento al minimizar la migración de H₂ además de incrementar la densidad de corriente y proporcionar mayor estabilidad operativa.

Las MEC de dos cámaras implican un mayor costo por el uso de membranas, pero ofrecen una eficiencia electroquímica superior gracias a la separación física entre los compartimientos.

Las configuraciones de tres cámaras representan una alternativa eficiente y equilibrada para combinar el tratamiento de aguas residuales con la generación de energía. El sistema BES-2 destaca por su capacidad de integrar una celda de combustible microbiana (MFC) con una celda de electrólisis microbiana (MEC), logrando suministrar energía a la MEC y abrir la posibilidad de la dependencia de una fuente externa de voltaje.

En cuanto a los microorganismos, esta revisión permitió comprender que el éxito de los sistemas bioelectroquímicos no depende únicamente de especies modelo como *Geobacter* o *Shewanella*, sino también del aprovechamiento de consorcios mixtos y bacterias no convencionales que, bajo condiciones adecuadas, pueden ofrecer una alta adaptabilidad y resiliencia. Este aspecto es particularmente relevante al considerar la aplicación en contextos rurales o sin acceso a tecnologías avanzadas, donde la simplicidad y la robustez del sistema son claves.

Los sistemas bioelectroquímicos, además, deben entenderse como plataformas modulares capaces de integrarse con otras tecnologías como los biorreactores anaerobios de membrana (AnMBR), tratamientos fotocatalíticos o procesos de remediación. Esta capacidad de hibridación permite abordar simultáneamente múltiples problemáticas ambientales, como la depuración de efluentes industriales, la reducción de carga orgánica y la generación de energía, en una sola unidad funcional.

La selección de la configuración debe basarse en el objetivo del sistema, considerando la relación entre eficiencia, costos, escalabilidad y aplicación final.

Los ánodos avanzados dopados con metales, biomateriales o modificados superficialmente superan ampliamente a los convencionales en conductividad y biocompatibilidad, aumentando la eficiencia del sistema BEH.

Nuevas estrategias para el diseño de cátodos, como el uso de materiales avanzados (Ni-foam), estructuras tridimensionales y semiconductores foto-asistidos, mejoran significativamente la producción de hidrógeno y eficiencia del sistema. bioenzimáticos y estímulos físicos abren el camino a rutas más sostenibles y con menor demanda energética, consolidando un panorama prometedor para la próxima generación de cátodos en sistemas bioelectroquímicos.

La producción bioelectroquímica de hidrógeno depende críticamente del tipo de sustrato empleado, destacando el potencial técnico y sostenible de residuos orgánicos como la orina humana, efluentes anaerobios y biomasa agroindustrial. Aquellos sustratos simples son más favorables por su alta biodegradabilidad y menor requerimiento de pretratamiento optimizando el costo del proceso de producción final.

A partir del análisis realizado, quedó claro que los electrocatalizadores desempeñan un papel clave en la eficiencia del sistema. Durante la revisión, se identificaron materiales como el

NiO.rGO y el MoS₂ sobre nanocarbono, capaces de impulsar la reacción de evolución de hidrógeno sin recurrir a metales nobles. Esto representa una ventaja importante en términos de accesibilidad y sostenibilidad, ya que son alternativas más económicas que alcanzan rendimientos comparables, lo que permite dimensionar el verdadero potencial de esta tecnología. Por otro lado, el uso de cátodos foto-asistidos y biocátodos plantea nuevas formas de incorporar energías limpias en el proceso, reduciendo el consumo eléctrico y acercándonos a un modelo más sustentable.

Por otro lado, las condiciones operativas estudiadas: pH, temperatura, salinidad, disponibilidad de nutrientes y régimen de operación, demostraron tener una influencia directa sobre el rendimiento del sistema. La interacción entre estas variables debe ser cuidadosamente gestionada para maximizar la producción de hidrógeno, mantener la estabilidad microbiana y evitar la formación de compuestos inhibidores. Asimismo, se comprobó que la operación en flujo continuo ofrece ventajas significativas para el escalamiento industrial frente a los sistemas por lotes, al asegurar una mayor eficiencia energética y una operación más estable.

Referencias Bibliográficas

- Acar, C., & Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 39, Issue 1, pp. 1–12). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.060>
- Akram, F., Fatima, T., Ibrar, R., & ul Haq, I. (2024). Biohydrogen: Production, promising progressions and challenges of a green carbon-free energy. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 69). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103893>
- Anoy, M. M. I., Hill, E. A., Garcia, M. R., Kim, W. J., Beliaev, A. S., & Beyenal, H. (2024). A directional electrode separator improves anodic biofilm current density in a well-mixed single-chamber bioelectrochemical system. *Enzyme and Microbial Technology*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2024.110502>
- Bajracharya, S., Bian, B., Jimenez-Sandoval, R., Matsakas, L., Katuri, K. P., & Saikaly, P. E. (2024). Nature inspired catalysts: A review on electroactive microorganism-based catalysts for electrochemical applications. *Electrochimica Acta*, 488. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144215>
- Castellano-Hinojosa, A., Gallardo-Altamirano, M. J., Pozo, C., González-Martínez, A., González-López, J., & Marshall, I. P. G. (2025). Salinity levels influence treatment performance and the activity of electroactive microorganisms in a microbial fuel cell system for wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124858>
- Cercado Quezada, B. (2016). Análisis de los factores que inciden en la producción de biohidrógeno en celdas de electrólisis microbianas. *Revista de Tecnología e Innovación*, 3, 21–34.

- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 45, Issue 7, pp. 3847–3869). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Fang, Z., Hu, J., Xu, M. Y., Li, S. W., Li, C., Zhou, X., & Wei, J. (2024). A biocompatible electrode/exoelectrogens interface augments bidirectional electron transfer and bioelectrochemical reactions. *Bioelectrochemistry*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2024.108723>
- Faruk Kilicaslan, A., & Dincer, I. (2025). Experimental investigation of integrated systems for biohydrogen and biomethane production: Effects of thermal parameters. *Thermal Science and Engineering Progress*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103475>
- Guan, F., Cai, J., Lin, H., Tang, J., Huang, L., & Yuan, Y. (2025). Microbial adaption of electroactive biofilms from real wastewater to nutrient starvation in bioelectrochemical systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116304>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121616>
- He, X., Zhou, H., Qian, X., Ma, J., Xian, P., Liang, S., Wang, L., & Fu, J. (2025). Iron containing carbon fibers exhibiting increased electron transfer and electroactive biofilm loading. *Journal of Power Sources*, 632. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236372>
- Hu, X., Wang, F., Zhao, Y., Li, X., Liu, J., Zhai, M., Wang, Q., Wang, J., Wang, W., Liu, R., & Dong, H. (2024). Synchronous hydrogen and electricity production by dual-cathodes in a

- bioelectrochemical system. *Journal of Cleaner Production*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140276>
- Huang, L., Kong, W., Song, S., Quan, X., & Li Puma, G. (2023). Treatment of industrial etching terminal wastewater using ZnFe₂O₄/g-C₃N₄ heterojunctions photo-assisted cathodes in single-chamber microbial electrolysis cells. *Applied Catalysis B: Environmental*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122849>
- Hubenova, Y., Borisov, G., Slavcheva, E., & Mitov, M. (2022). Gram-positive bacteria covered bioanode in a membrane-electrode assembly for use in bioelectrochemical systems. *Bioelectrochemistry*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.108011>
- Hwang, J. H., Fahad, S., Ryu, H., Rodriguez, K. L., Domingo, J. S., Kushima, A., & Lee, W. H. (2022). Recycling urine for bioelectrochemical hydrogen production using a MoS₂ nano carbon coated electrode in a microbial electrolysis cell. *Journal of Power Sources*, 527. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231209>
- Jadhav, D. A., Kumar, G., Jang, J. K., & Chae, K. J. (2024). Biohydrogen upgradation and wastewater treatment in 3-chambered bioelectrochemical system assisted with H₂/O₂-based redox reactions. *Journal of Environmental Management*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122209>
- Jayabalan, T., Matheswaran, M., Preethi, V., & Naina Mohamed, S. (2020). Enhancing biohydrogen production from sugar industry wastewater using metal oxide/graphene nanocomposite catalysts in microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(13), 7647–7655. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.068>
- Kandpal, R., Ali, S. W., & Ahammad, S. Z. (2025). Textile-based flexible electrodes Enriching high power density electroactive biofilms dominated by *Lysinibacillus* for Energy-Positive

- textile wastewater Remediation in Multielectrode Assembly bioelectrochemical systems. *Chemical Engineering Journal*, 507. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159947>
- Keruthiga, K., Mohamed, S. N., Gandhi, N. N., & Muthukumar, K. (2021). Sugar industry waste-derived anode for enhanced biohydrogen production from rice mill wastewater using artificial photo-assisted microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(39), 20425–20434. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.181>
- Mateos González, R. (2025). Sistemas bioelectroquímicos. Electrificando microorganismos. *Ambiociencias*, 22, 91–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.18002/ambioc.i22.8622>
- Matsuo, R., Watanabe, S., & Okabe, S. (2025). Microbial photoelectrochemical cell using hybrid CuO/ZnO/CuO and *Shewanella oneidensis* MR-1 anode for hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 505. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.159093>
- Noori, M. T., Rossi, R., Logan, B. E., & Min, B. (2024). Hydrogen production in microbial electrolysis cells with biocathodes. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 42, Issue 7, pp. 815–828). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2023.12.010>
- Park, S. G., Rhee, C., Jadhav, D. A., Jang, J. H., Hwang, M. H., & Chae, K. J. (2025). Enhanced hydrogen production in microbial electrolysis cells through a magnetically induced electroactive anode biofilm. *Chemical Engineering Journal*, 505. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.159071>
- Prudente, M. (2023). *Electrodos bio-híbridos crioestructurados para la generación de corriente eléctrica a partir de orina*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA.
- Sikarwar, D., Das, I., Ganta, A., Nambi, I. M., Erable, B., & Das, S. (2025). Microbial electrolysis cells: Fuelling the future with biohydrogen – A review. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100224>

- Wang, J., Wang, K., Li, W., Wang, H., & Wang, Y. (2024). Enhancing bioelectrochemical processes in anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: A comprehensive review. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 484). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149420>
- Wang, S., Zhao, D., Qiu, Z., Zhang, G., & Lin, C. (2025). 3D porous carbon materials in situ-embedded with Fe₃C/Fe nanoparticles as high-performance anode electrocatalysts of microbial fuel cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116171>
- Zhang, J., Sheng, X., Ding, Z., Wang, H., Feng, L., Zhang, X., Wen, L., Jiang, L., & Feng, X. (2021). Decoupling hydrogen production from water oxidation by integrating a triphase interfacial bioelectrochemical cascade reaction. *Science Bulletin*, 66(2), 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.08.010>