

Revisión Sistemática del Estado del Arte Sobre la Aplicación de Sistemas
Bioelectroquímicos a aguas residuales

Edgar Fernando Jerez García, Brayan Andrés Quintero Araque

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Viviana Sánchez Torres

PhD En Ingeniería Química

Codirector

Jorge Alberto Albarracín Arias

Mg. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este proyecto lo dedico a mis padres, Edgar Jerez Lizarazo y Claudia García Blanco y a mi hermana, María Fernanda Jerez García, por el tiempo, dedicación y apoyo incondicional que me brindaron en todo momento para poder cumplir este sueño de ser ingeniero, este logro también es de ustedes.

Edgar Fernando Jerez García

Este proyecto lo dedico a mis padres Pedro Antonio Quintero Tarazona y Ludy Janeth Araque Triana, mi hermana Nikol Andrea Quintero Araque y mi tía Mary Luz Araque Triana el pilar fundamental que apoya mis decisiones los que alientan mi progreso para hacer realidad mis propósitos y los que me motivan a continuar.

Brayan Andrés Quintero Araque

Agradecimientos

Quiero agradecerle primero que todo a mis padres y a mi hermana, los cuales fueron indispensables tanto anímica como económicamente para poder cumplir mis sueños. En segundo

lugar, quiero agradecerle a mis tíos y a mis abuelos, quienes con sus palabras de aliento me ayudaron a nunca dejar de creer que el sueño de ser ingeniero fuera posible. En tercer lugar, quiero agradecerle a la profesora Viviana Sánchez y a el ingeniero Jorge Albarracín, los cuales con mucha paciencia y dedicación nos ayudaron a hacer posible la consecución de este trabajo.

Finalmente, quiero agradecerles a mis amigos, a mis parceros del alma Anasol Mantilla, Sebastián Carvajal, Luis Ángel Pinilla, Daniel Guardiola y los demás amigos que hice en este gran camino, que, sin apoyo, sin sus risas, lagrimas, fiestas y noches de estudio no sería la persona que soy el día de hoy, este trabajo también es para ustedes.

Edgar Fernando Jerez García.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a las personas que fueron un apoyo para mí durante la elaboración de este proyecto final. Así, quiero agradecer a Pedro Antonio Quintero Tarazona, Ludy Janeth Araque Triana y Mary Luz Araque Triana, mis padres y mi tía, respectivamente, gracias a sus esfuerzos tuve la posibilidad de acceder a una educación superior de calidad en una de las mejores universidades del país y han sido un apoyo incondicional durante todo este proceso. Quiero agradecer a mi directora, Viviana Sánchez Torres y a mi codirector, Jorge Alberto Albarracín Arias por el conocimiento compartido, la paciencia y el tiempo dedicado para la elaboración de este proyecto. Quiero agradecer a Diana Felisa Fonseca González, pues de no haberme prestado su computador tras perder el mío, no hubiese sido posible culminar el proyecto a tiempo. Además, quiero agradecerles a mis amigos más cercanos por motivarme y presionarme en todo momento a trabajar en el proyecto. Finalmente, y no por esto menos importante, quiero agradecerle a Nikol Andrea Quintero Araque, el motor de mi vida, pues sin su compañía, sus consejos y su sonrisa llegar hasta este punto no hubiese sido posible para mí.

Brayan Andrés Quintero Araque

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco conceptual.....	15
2.1 Electroquímica.....	15
2.2 Sistemas Bioelectroquímicos.....	15
2.2.1 Membranas de intercambio iónico.....	16
2.2.2 Celdas de combustible microbianas (CCM).....	16
2.2.3 Celdas de electrólisis microbianas (CEM).....	17
2.2.4 Celdas de electrofermentación (CEF).....	17
2.3 Microorganismos Presentes en los Sistemas Bioelectroquímicos.....	18
2.3.1 Exoelectrógenos.....	19
2.3.2 Electríficos.....	19
2.3.3 Metanógenos.....	19
2.4 Inóculo en los Sistemas Bioelectroquímicos.....	20
2.4.1 Cultivo puro.....	20
2.4.2 Cultivo mixto.....	20
2.5 Mecanismos de Transferencia Extracelular de Electrones.....	20
2.5.1 Transferencia directa de electrones.....	21
2.5.2 Transferencia semidirecta de electrones.....	21

2.5.3 Transferencia de electrones por mediadores	21
3. Metodología	22
3.1 Fase 1 Búsqueda Bibliográfica	22
3.2 Fase 2 Síntesis de la Información.....	23
3.3 Fase 3 Propuesta Experimental.....	23
4. Resultados.....	24
4.1 Análisis Bibliométrico	24
4.1.1 Medio de cultivo.....	26
4.1.2 Efectos de los tipos de cultivo y materiales de los electrodos	27
4.1.3 Condiciones de operación.....	30
4.1.3.1 PH.	30
4.1.3.2 Temperatura.	30
4.1.3.3 Oxígeno.....	31
4.1.4 Tipos de diseño de los sistemas bioelectroquímicos	33
4.1.4.1 Ejemplos de diseños	33
4.2 Pruebas y análisis efectuadas en los sistemas bioelectroquímicos.....	36
4.2.1 Voltaje de circuito abierto.....	36
4.2.2 Densidad de potencia.....	36
4.2.3 Densidad de corriente	37
4.2.4 Eficiencia coulombimétrica	37
4.2.5 Curvas de polarización	38
4.2.6 Voltametría lineal	38
4.2.7 Voltametría cíclica	39

REVISIÓN SISTEMÁTICA SISTEMAS BIOELECTROQUÍMICOS

7

4.2.8 Demanda química de oxígeno (DQO).....	40
4.3 Protocolo Experimental.....	40
4.3.1 Estrategia experimental propuesta para el tratamiento de aguas residuales domesticas con CCM.....	41
5. Conclusiones.....	42
6. Recomendaciones.....	43
Referencias Bibliográficas.....	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Reacciones Redox en los Sistemas Bioelectroquímicos.....	17
Tabla 2 Análisis por Tipos de Cultivos Puros	27
Tabla 3 Análisis por Tipos de Cultivos Mixtos	28
Tabla 4 Identificación de Efectos de las Condiciones	31
Tabla 5 Tipos de Diseños	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Sistemas Bioelectroquímicos	18
Figura 2 Tipos de Transferencia de Electrones	21
Figura 3 Fases Definidas para el Desarrollo del Proyecto	22
Figura 4 Detalle Depuración de Documentos.....	24
Figura 5 Distribución Geográfica de los Artículos	25
Figura 6 Número de Artículos por Año	25
Figura 7 Distribución de Artículos por Sistema	26
Figura 8 Diferentes Tipos de Diseños de Sistemas Bioelectroquímicos	34
Figura 9 Estrategia Experimental Propuesta	41

Resumen

Título: Revisión Sistemática del Estado del Arte sobre la aplicación de Sistemas Bioelectroquímicos a Aguas Residuales*

Autor: Edgar Fernando Jerez García, Brayan Andrés Quintero Araque**

Palabras Clave: Aguas residuales, Bacterias, Celdas de combustible microbianas, Celdas de electrólisis microbianas, Electrofermentación.

Descripción: Los sistemas bioelectroquímicos (SBE), utilizan los principios de la electroquímica tradicional para transformar la energía química en eléctrica, además de aplicar una diferencia de potencial generando una síntesis química, esto se consigue a través de microorganismos que actúan como catalizadores dada su capacidad de oxidar material orgánico y a su vez generar productos de valor agregado, estos surgen como una alternativa para mitigar las problemáticas ambientales que se han generado a partir del exceso de residuos orgánicos domésticos e industriales. Esto es importante en un país como Colombia en donde el incremento de la población y de la industria en general ha ocasionado impactos negativos en el medio ambiente en cuanto a la producción de desechos y residuos que contaminan los cuerpos hídricos.

En este trabajo se realizó una revisión sistemática a la literatura existente sobre los principales sistemas bioelectroquímicos empleados para valorizar diferentes aguas residuales, en donde se seleccionaron un total de 88 artículos teniendo en cuenta las condiciones de operación, microorganismos, diseños, métodos experimentales. El sistema bioelectroquímico más estudiado hasta la fecha para el tratamiento de aguas residuales son las celdas de combustible microbianas en donde se encontró que los parámetros de temperatura y de pH óptimos fueron de 25-60°C y 5-7.5, respectivamente, a su vez se evidencia que pruebas electroquímicas como la voltametría cíclica y las curvas de polarización son necesarias para tener un análisis profundo de los sistemas bioelectroquímicos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Programa académico. Director: Viviana Sánchez Torres. PhD en Ingeniería Química. Codirector: Jorge Alberto Albarracín Arias. Mg en Ingeniería Química

Abstract

Title: Systematic State of the Art Review on the Application of Bioelectrochemic Systems to Wastewater*

Author(s): Edgar Fernando Jerez García, Brayan Andrés Quintero Araque**

Key Words: Wastewater, Bacteria, Microbial fuel cells, Microbial electrolysis cells, Electrofermentation.

Description: Bioelectrochemical systems (SBE) use the principles of traditional electrochemistry to transform chemical energy into electrical energy, in addition to applying a potential difference generating a chemical synthesis, this is achieved through microorganisms acting as catalysts given their ability to oxidize organic material and in turn generate value-added products, these arise as an alternative to mitigate the environmental problems that have been generated from the excess of domestic and industrial organic waste. This is important in a country like Colombia where the increase in population and industry in general has caused negative impacts on the environment in terms of the production of waste and waste that pollute water bodies.

In this work a systematic review was made of the existing literature on the main bioelectrochemic systems used to valorize different wastewater, where a total of 88 articles were selected taking into account the operating conditions, microorganisms, designs, experimental methods. The most studied bioelectrochemic system to date for wastewater treatment are microbial fuel cells where optimal temperature and pH parameters were found to be 25-60°C and 5-7.5, respectively, In turn, it is shown that electrochemical tests such as cyclic voltametry and polarization curves are necessary to have a thorough analysis of bioelectrochemic systems.

* Degree Work

**Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Academic program. Director: Viviana Sánchez Torres. PhD in Chemical Engineering. Co-director: Jorge Alberto Albarracín Arias. Mg in Chemical Engineering

Introducción

La globalización ha traído consigo un avance industrial, económico, social y político importante a nivel mundial, el cual ha permitido que la mayoría de la población mejore su calidad de vida y que por ende se incremente el número de habitantes en el planeta, de acuerdo a cifras de la ONU (2020) se estima que la población mundial aumente en 2.000 millones de personas en los próximos 30 años.

En Colombia, el incremento de la población y de la industria en general han ocasionado impactos negativos en el medio ambiente en cuanto a la producción de desechos y residuos que contaminan los cuerpos hídricos, de en el año 2017 la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios) reportó que de los 1.122 municipios que conforman el país, únicamente 541 municipios tienen algún tipo de sistema de saneamiento, es decir solo el 48% de las aguas residuales urbanas son tratadas, (Saldaña, 2020). Esto ocasiona además de impactos ambientales, daños en la salud de las personas reflejados en enfermedades como diarrea, vómito, disentería y cólera las cuales si no son tratadas a tiempo pueden llegar a ocasionar la muerte

Desde el año 2015, Colombia inició su proceso de adherirse a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos hasta el año 2030, y con esto, promover la economía circular en el país. En lo relacionado con el agua el objetivo de desarrollo sostenible 6 indica: “Agua limpia y saneamiento”, basado en esto se emite por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la Resolución 631 de 2015 mediante la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, Datarepública (2020). Es así entonces, como toman gran importancia en el país las plantas para el tratamiento de aguas residuales (PTAR) y las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

Se han identificado variedad de tecnologías que han ido tomando fuerza en los últimos años dado que utilizan microorganismos (comúnmente bacterias electrogénicas) capaces de oxidar material orgánico y a la vez transferir electrones a electrodos, además de generar otros productos de valor agregado, (Rodenas, 2020). Este tipo de tecnologías han tenido aplicabilidad principalmente en el desarrollo de celdas de combustible microbianas (CCM), celdas de electrólisis microbianas (CEM) y celdas de electrofermentación (CEF), (Santoro et al., 2017).

En este trabajo de grado se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre los principales sistemas bioelectroquímicos empleados para valorizar diferentes aguas residuales (agroindustriales y domésticas), buscando conocer los diferentes microorganismos utilizados, diseños de celdas, condiciones de operación, electrodos utilizados, entre otras. Este trabajo tiene relación directa con la línea de investigación del Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA); la “Remediación ambiental, tratamiento de efluentes y valorización de residuos”.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre los principales sistemas bioelectroquímicos para la generación de productos con alto valor agregado a partir de aguas residuales.

1.2 Objetivos Específicos

Efectuar un análisis bibliométrico entre los años 2001 a 2021, de la literatura científica referente a los efluentes tratados, microorganismos empleados y productos obtenidos en estudios basados en las CCM, las CEM y los sistemas de electro fermentación.

Identificar los diferentes métodos experimentales utilizados para analizar el desempeño de los sistemas bioelectroquímicos.

Proponer un protocolo experimental de un sistema bioelectroquímico según condiciones seleccionadas a partir de la revisión sistemática de la literatura.

2. Marco conceptual

2.1 Electroquímica

La electroquímica es la rama de la química que estudia la relación entre la energía química y la energía eléctrica. Las reacciones químicas son las que eventualmente producen la energía eléctrica, sin embargo, este proceso puede llevarse a cabo a la inversa, es decir, el paso de cierta corriente eléctrica puede generar reacciones químicas. Entre las reacciones competentes a esta rama se encuentran las reacciones de óxido-reducción o reacciones redox, en las cuales se produce una transferencia de electrones entre dos especies; un reactivo que se oxida (agente reductor) y un reactivo que se reduce (agente oxidante), (Hepler, 1968).

2.2 Sistemas Bioelectroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos se basan en la capacidad de algunos microorganismos para catalizar diferentes reacciones electroquímicas, específicamente, reacciones de óxido-reducción que involucran una transferencia de electrones desde el interior de las células hasta un electrodo, (Rabaey et al., 2007). Las celdas de combustible microbianas (CCM), las celdas de electrólisis microbianas (CEM) y las celdas de electrofermentación (CEF) son sistemas catalogados como bioelectroquímicos que se diferencian entre sí por su modo de operación, configuración y aplicabilidad. Para cumplir sus funciones estos sistemas cuentan con dos partes básicas fundamentales, las membranas de intercambio iónico y los electrodos. A continuación, se definen las dos partes básicas anteriormente mencionadas y su función en cada uno de los tres sistemas bioelectroquímicos a tratar.

2.2.1 Membranas de intercambio iónico

Su función es separar las cámaras anódica y catódica de los sistemas para que se lleven a cabo los procesos de oxidación sin la interferencia de un agente oxidante no deseado en el proceso. Se ha demostrado que la presencia de membrana de intercambio iónico puede incrementar la difusión de oxígeno y sustrato a través del sistema, pero esto se traduce en una menor eficiencia y disminución de la actividad del microorganismo en el ánodo. Las membranas de intercambio iónico se diferencian de los otros tipos de membrana por tener grupos funcionales ionizables, los cuales son permeables a electrolitos en solución acuosa. Cuando las membranas contienen grupos cargados negativamente, se denominan membranas de intercambio catiónico, por el contrario, cuando están cargadas positivamente se denominan membranas de intercambio de aniones, (Rabaey et al., 2007).

2.2.2 Celdas de combustible microbianas (CCM)

Son dispositivos en los cuales una o varias especies microbianas convierten la energía química contenida en la materia orgánica en energía eléctrica. Estos microorganismos se alimentan de desechos orgánicos biodegradables y producen electrones que son transferidos a un electrodo para generar electricidad. Cabe añadir que las reacciones involucradas en este sistema se dan de forma espontánea. En las CCM los electrodos son los que permiten llevar a cabo la generación de energía eléctrica, en el ánodo las bacterias llevan a cabo la oxidación del sustrato y en el cátodo es donde llegan los electrones que se transportaron por un circuito externo, liberando los electrones gracias a la acción de rutas metabólicas, (Bermúdez y Bernal, 2018).

2.2.3 Celdas de electrólisis microbianas (CEM)

Son dispositivos cuyo funcionamiento es parecido al de las CCM, con la diferencia de que las CEM necesitan un suministro de energía para que las reacciones dentro de la cámara anódica se den (no son espontáneas). Sus principales productos son biogás e hidrógeno. En este tipo de celdas en los electrodos ocurre los mismos procesos que en las CCM, con la diferencia de que se utilizan los electrones que llegan al cátodo con la finalidad de combinarse con los protones para producir H₂, (Aguilar et al., 2016).

2.2.4 Celdas de electrofermentación (CEF)

En estos sistemas ocurre la fermentación de un sustrato rico en energía, como un carbohidrato o un alcohol, en el que los electrodos proporcionan una fuente o sumidero de electrones suplementarios. La corriente eléctrica no es el producto de interés ni la principal fuente de energía, sino un desencadenante que permite que el proceso de fermentación se produzca en condiciones desequilibradas. En las CEF los electrodos sólidos se insertan en los reactores de fermentación y sirven como donantes o aceptores de electrones inagotables, (Schievano et al., 2016).

Tabla 1

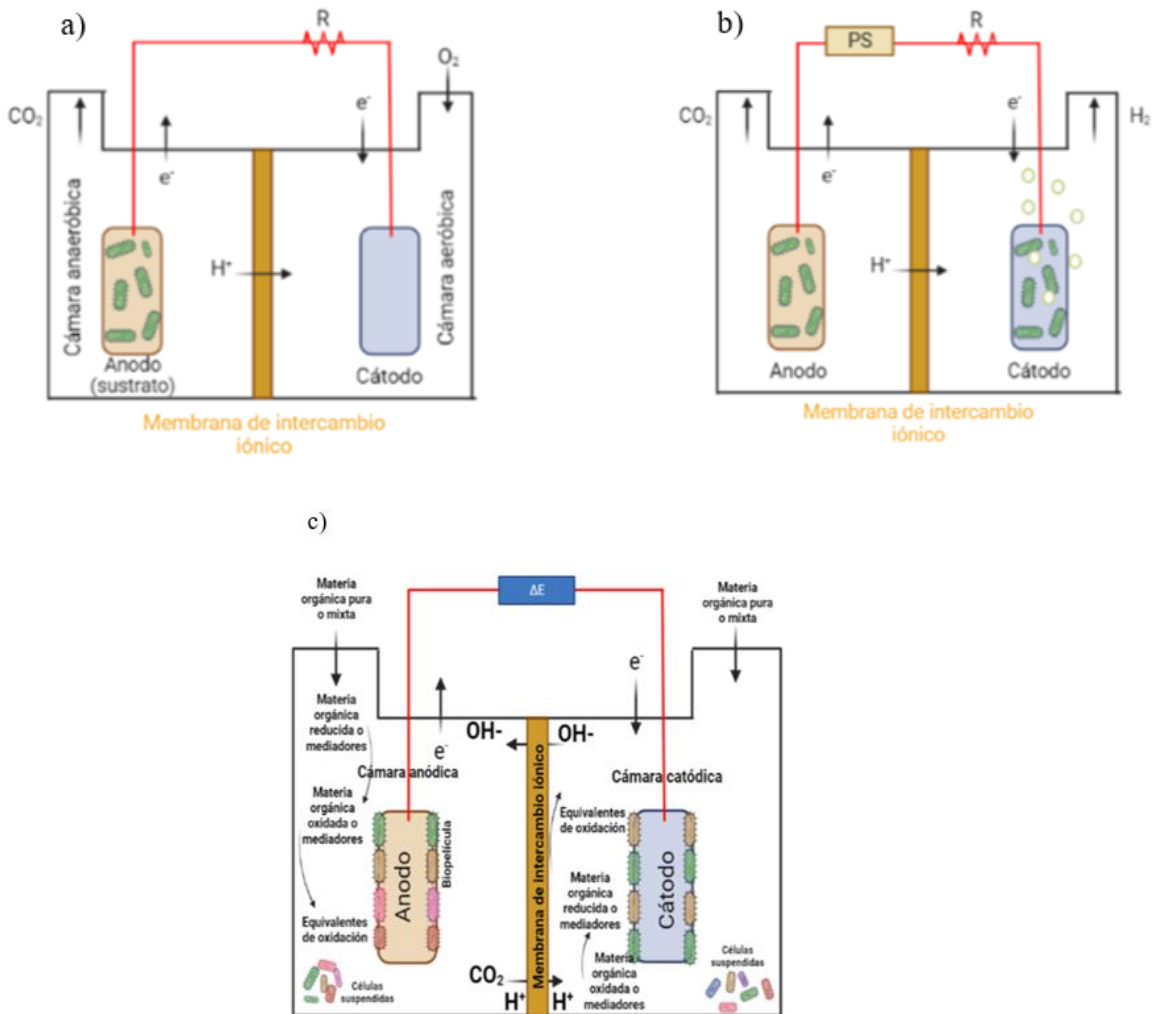
Reacciones Redox en los Sistemas Bioelectroquímicos

Sistema	Celdas de combustible microbianas (CCM)	Celdas de electrólisis microbianas (CEM)	Celdas de electro fermentación (CEF)
Reacción anódica	$\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 7\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 8\text{e}^- + 8\text{H}^+$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Reacción catódica	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2$	-

Nota: Elaborado por los Autores

Figura 1

Sistemas Bioelectroquímicos



Nota: Celda de combustible microbiana (CCM) b) Celda de electrólisis microbiana (CEM) c) Celda de electro fermentación (CEF), tomado de Aguilar et al (2016).

2.3 Microorganismos Presentes en los Sistemas Bioelectroquímicos

El material orgánico que se encuentra en las aguas residuales es degradado por microorganismos que se encuentran suspendidos en el medio líquido, y en la superficie del ánodo,

por lo que la elección de la comunidad microbiana juega un papel importante en el éxito de la aplicabilidad que se le va a dar al sistema. A continuación, se describen los tres tipos de microorganismos más relevantes en los sistemas bioelectroquímicos, (Cao et al., 2019).

2.3.1 Exoelectrógenos

Estos obtienen energía de su entorno para apoyar su crecimiento y mantenimiento y así poder transferir electrones a la superficie del ánodo para generar una corriente eléctrica, (Cao et al., 2019). Para el caso de las CCM, su principal objetivo es la generación de energía, por lo tanto, las especies microbianas indicadas son los microorganismos exoelectrogénicos.

2.3.2 Electríficos

Las especies microbianas electrotróficas son utilizadas principalmente en procesos que requieran una especie de biocatalizador en el cátodo como en el caso de las CEM, puesto que a diferencia de los exoelectrógenos tienen la capacidad de recibir fácilmente electrones, por lo tanto estos microbios desempeñan un papel esencial en la desintegración de elementos aromáticos, oxidación de metales, descomposición de sustancias orgánicas de desecho, ciclo del carbono, reducción, entre otros, (Cao et al., 2019).

2.3.3 Metanógenos

Los metanógenos son una comunidad microbiana capaz de metabolizar el acetato y el hidrógeno para producir metano, lo cual resulta en una competencia trófica con las bacterias electroactivas por estos dos sustratos y en una considerable disminución de la eficiencia Culombimétrica del sistema. Estas competencias tróficas en cultivos anaeróbicos mixtos pueden ser controladas por parámetros como el pH o el tiempo de retención hidráulica. En el caso de los sistemas bioelectroquímicos, variar la resistencia es una alternativa para controlar las rutas metabólicas, (Kokko et al., 2018).

2.4 Inóculo en los Sistemas Bioelectroquímicos

Es el material bacteriano inicial que se adiciona a los sistemas bioelectroquímicos, el cuál crece y se reproduce a partir del aprovechamiento de los nutrientes que allí se encuentran. En los sistemas bioelectroquímicos se pueden emplear cultivos de una especie microbiana (puros) o cultivos mixtos (consorcios), (Cao et al., 2019).

2.4.1 Cultivo puro

Se componen de una sola especie microbiana, lo cual posibilita la modificación genética de la especie para la mejora de su desempeño, (Cao et al., 2019).

2.4.2 Cultivo mixto

Se componen por varias comunidades microbianas. Presentan resistencia a los cambios, por lo que resulta útil cambiarles las condiciones de operación para efectuar investigaciones detalladas acerca de un factor solitario y, al mismo tiempo, tener un impacto sinérgico entre los microorganismos para mejorar la estabilidad y el rendimiento de los sistemas, (Cao et al., 2019).

2.5 Mecanismos de Transferencia Extracelular de Electrones

Los sistemas bioelectroquímicos requieren de una transferencia de electrones producidos por el metabolismo microbiano hacia el sistema eléctrico, con el objetivo de generar la corriente a través de este. La transferencia requiere de moléculas transportadoras que hacen la función de intermediarios en las reacciones de óxido-reducción, entre estas se encuentran proteínas de membrana como los citocromos tipo c, o de conductos proteicos denominados pilis que sirven como nanoconductores. En los sistemas bioelectroquímicos el flujo de electrones se da en dos direcciones; la primera, desde los microorganismos hacia el electrodo (ánodo), para el caso de las CCM y desde el electrodo (cátodo) hacia los microorganismos, para el caso de las CEM y las CEF, (Martins et al., 2010).

2.5.1 *Transferencia directa de electrones*

Se da cuando la célula tiene contacto directamente con el electrodo lo cual permite la transferencia de electrones de forma inmediata haciendo más ágil el proceso, (Schink, 2001).

2.5.2 *Transferencia semidirecta de electrones*

Dado que no todos los microorganismos pueden estar tan juntos, hay algunos que están un poco alejados del electrodo, por ende, autogeneran unos nanotubos de proteína llamados pilis, con los cuales se enlazan para realizar la transferencia de electrones y de este modo transferirlos, (Malvankar y Lovley, 2014).

2.5.3 *Transferencia de electrones por mediadores*

En este mecanismo no existe contacto directo con el electrodo, por ende, se apoya en mediadores químicos que pueden ser producidos naturalmente por la célula (cómo los subproductos) o añadidos externamente. La función de estos mediadores es ingresar a la célula para extraer los electrones y transportarlos hasta el ánodo (He et al., 2017). A continuación, se muestra de forma gráfica los diferentes mecanismos de transferencia de electrones explicados anteriormente.

Figura 2

Tipos de Transferencia de Electrones



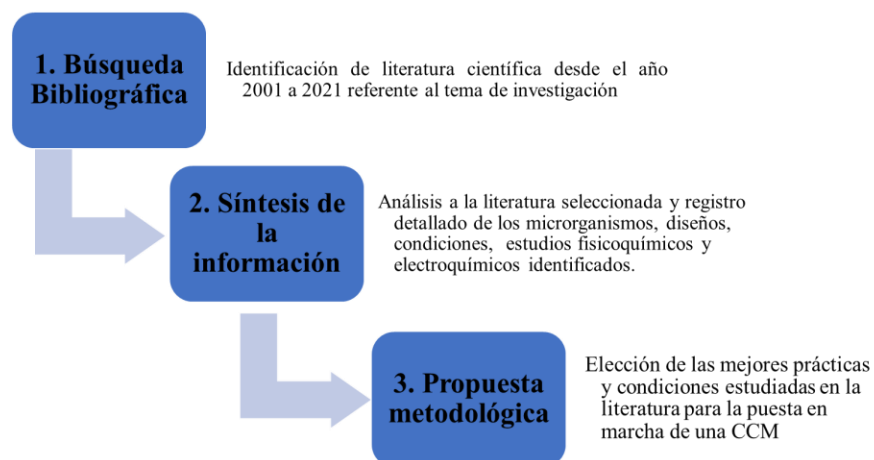
Nota: Elaborado por los Autores

3. Metodología

En este trabajo se realizó una investigación respecto a los diferentes sistemas bioelectroquímicos, la cual se llevó a cabo a partir de diferentes fases metodológicas con el propósito de plantear una ruta que condujera al desarrollo de los objetivos planteados para el proyecto.

Figura 3

Fases Definidas para el Desarrollo del Proyecto



Nota: Elaborado por los Autores

3.1 Fase 1 Búsqueda Bibliográfica

Para esta fase se seleccionó el buscador Scopus por ser el que consolidaba gran cantidad de bases de datos que contenían literatura científica relacionada con el tema de investigación. Se definió un rango de búsqueda de 20 años y como parámetros de búsqueda un intervalo de tiempo comprendido entre el año 2001 al 2021. Como palabras clave se seleccionaron “Agua residual”, “Bacteria”, “Design”, “Microbial Fuel Cells”, “Microbial Electrolysis Cells”, “Electro Fermentation” y “Bioelectrochemical systems”. Posterior a que el buscador arrojara los

documentos relacionados con los parámetros de búsqueda, se efectuó la validación de estos, de acuerdo con su título, resumen, introducción y conclusiones con el propósito de identificar cuales proporcionaban información para lograr los objetivos específicos planteados.

3.2 Fase 2 Síntesis de la Información

Una vez se determinó la documentación objeto de análisis se extrajeron datos precisos de cada uno; como lo son tipos de microorganismos, tipos de cultivos, mecanismos de transferencia de electrones, el pH, la temperatura, el diseño aplicado, las técnicas electroquímicas utilizadas como lo son (la densidad de corriente, la eficiencia Coulombimétrica, curvas de polarización, entre otras).

3.3 Fase 3 Propuesta Experimental

La revisión efectuada permitió identificar que los sistemas bioelectroquímicos que se aplican con mayor frecuencia para el tratamiento de aguas residuales son las celdas de combustible microbianas. Por lo tanto, se seleccionaron condiciones de operación para formular una estrategia experimental con una CCM, para darle continuidad al trabajo previo en CCM realizado en el laboratorio de biotecnología del grupo GIMBA de la Universidad Industrial de Santander, (Albarracín et al., 2021).

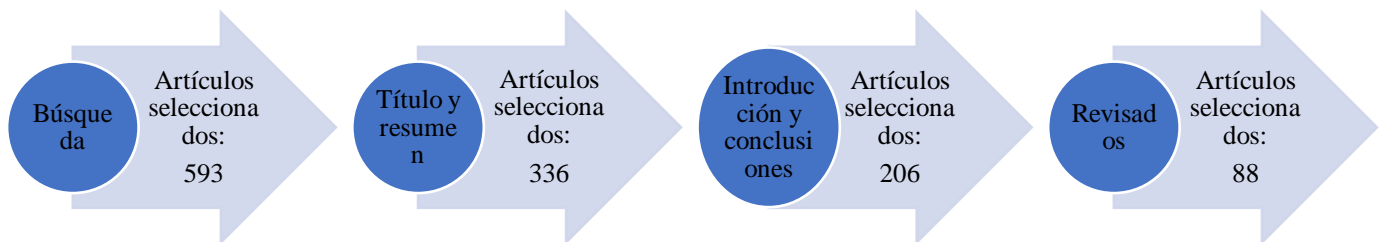
4. Resultados

4.1 Análisis Bibliométrico

Con la búsqueda bibliográfica inicial se seleccionaron 593 documentos entre artículos, tesis e investigaciones. Al revisar los títulos y resúmenes de cada uno, se seleccionaron 336 documentos. Posteriormente, se revisó la introducción y las conclusiones, siendo seleccionados 206 documentos. Finalmente, se seleccionaron 80 documentos en los que describen explícitamente investigaciones, estudios y análisis de sistemas bioelectroquímicos. A continuación, se refleja el procedimiento mencionado:

Figura 4

Detalle Depuración de Documentos



Nota: Elaborado por los Autores

Los 88 documentos seleccionados se clasificaron por país, año y tipo de sistema bioelectroquímicos, como se puede apreciar en las siguientes figuras.

Figura 5

Distribución Geográfica de los Artículos

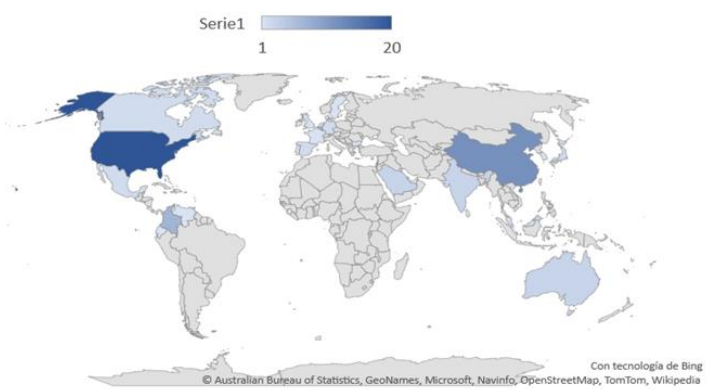
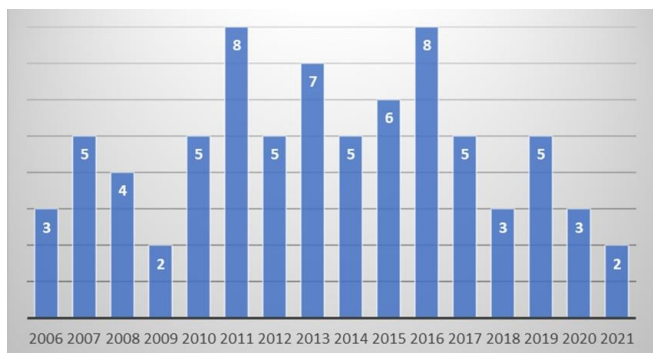


Figura 6

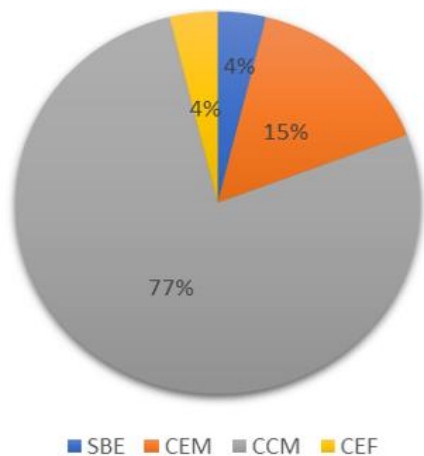
Número de Artículos por Año



Nota: Elaborado por los Autores

Figura 7

Distribución de Artículos por Sistema



Nota: Elaborado por los Autores

Este análisis permite identificar que los países con mayor producción de literatura acerca del tema son Estados Unidos y China.; Así mismo los años donde más se han publicado investigaciones fueron el 2011 y el año 2016, finalmente estos documentos reflejan que el sistema bioelectroquímico con mayor investigación son las CCM, dado que representa el 77% de la literatura objeto de estudio.

4.1.1 Medio de cultivo

Conjunto de nutrientes que, en concentraciones adecuadas y en condiciones físicas y químicas óptimas, favorecen el crecimiento de los microorganismos. En el caso de los sistemas bioelectroquímicos se cuenta con medios de cultivo complejos y medios de cultivo puros o sintéticos. Los primeros están constituidos por sustancias de carácter orgánico de las cuales se desconoce la totalidad de sus componentes y las cantidades exactas presentes de cada uno de ellos. En cuanto a los segundos, se componen de sustancias químicas cuya naturaleza, composición y cantidad se conoce, (Clavell y Pedrique, 1992).

4.1.2 Efectos de los tipos de cultivo y materiales de los electrodos

El material del cual están hechos los electrodos influye significativamente en la formación de la biopelícula y el comportamiento catalítico en relación con la transferencia de electrones, (Guo et al., 2015). Estos en su mayoría están hechos a base de carbono (fieltro de carbono, fibra de carbono, entre otros), sin embargo, se encuentran en el mercado algunos fabricados a base de titanio, cobre y zinc. Al día de hoy no se tiene total claridad de cómo es que se da esta afinidad entre el electrodo y el inóculo debido a las complejas interacciones de los consorcios microbianos, (Mora y Bravo, 2016).

En las tablas relacionadas a continuación se sintetiza la información reportada en la literatura respecto al tipo de inóculos, mecanismo de transferencia, materiales de membranas y material de los electrodos, cabe aclarar que los experimentos expuestos a continuación se llevaron a cabo en CCM.

Tabla 2

Análisis por Tipos de Cultivos Puros

Inóculo	Mecanismo de transferencia de electrones	Material de la membrana	Material del ánodo	Material del cátodo	Energía obtenida (mW/m ²)	Referencias
<i>Candida melibiosica 2491</i>	Mediada	Nafion 117, Du Pont	Fieltro de carbono	Fieltro de carbono	260 ± 8	(Hubenova et. al., 2011)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	Nafion membrane 115	Grafito de carbono	Grafito de carbono	451.26	(Nor et.al., 2015)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Mediada	Membrana de intercambio de protones Nafion 117, Dupont & Co., Fayetteville, NC	Bloque de grafeno	Bloque de grafeno	7.8	(Jayapriya & Ramamurthy., 2012)
<i>Escherichia coli k12</i>	Mediada	Nafion 117, Du Pont	Tela de carbono no tratada	Tela de carbono no tratada	9.8	(Reiche & Kirkwood ,2012)

<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Directa	Membrana de intercambio de protones (Nafión)	Acero inoxidable	Papel carbón	7	(Kim & Lee, 2010)
<i>Bacillus subtilis</i>	Mediada	Membrana de intercambio protónico	Tela de carbono	Papel de carbono con catalizadores de platino	1.066	(Nimje et. al., 2009)

Nota: Elaborado por los Autores

Tabla 3

Análisis por Tipos de Cultivos Mixtos

Inóculo	Mecanismo de transferencia de electrones	Material de la membrana	Material del ánodo	Material del Cátodo	Energía obtenida (mW/m ²)	Referencias
<i>Aguas residuales domésticas</i>	Directo y semidirecto	Membrana polimérica de intercambio de protones (Nafion 117, Dupont)	Filtro de carbono	Tela de carbono (cátodo al aire)	28±3	(Liu & Logan, 2004)
<i>Aguas residuales domésticas</i>	Directo y semidirecto	-	Papel carbón Toray	Tela de carbono (cátodo al aire)	146±21	(Liu & Logan, 2004)
<i>Aguas residuales domésticas</i>	Transferencia de electrones mediada	Membrana de intercambio catiónico (Ultrex CMI7000)	Grafito	Grafito	8 W/m ³	(Clauwaert et. al., 2007)
<i>Aguas residuales porcinas</i>	-	Membrana polimérica de intercambio de protones (Nafion 117, Dupont)	Grafito	Aire	12.2	(Liu et. al., 2004)

<i>Aguas residuales hospitalarias</i>	-	-	Fibra de carbono	Carbón activado (cátodo al aire)	750 ± 70	(Kim et.al., 2016)
<i>Aguas residuales domésticas</i>	-	Membrana de intercambio de protones (Nafion 117)	Varilla de grafito	Placa de grafito	102.93 mW/m ³	(Guo et. al.,2014)

Nota: Elaborado por los Autores

En la bibliografía se encontró que los materiales utilizados con mayor frecuencia en los sistemas bioelectroquímicos son los alótropos del carbono, como lo son las varillas de grafito, tela de carbón, papel carbón, fieltro de carbón y el carbón reticulado, o materiales metálicos como acero inoxidable,(Mustakeem, 2015). Esto debido a que poseen propiedades que les permite soportar alto esfuerzo físico convirtiéndolos en materiales idóneos para soportar condiciones ambientales extremas, cómo lo es para el caso de los medios de cultivo mixto. Además (W. Zhang et al., 2016), usaron materiales de extensa área superficial y alta conductividad, esto se puede corroborar con la información recopilada de en las anteriores tablas en las columnas referentes a materiales del ánodo y cátodo para cada una de las pruebas experimentales presentadas.

En la tabla de cultivos puros, se observa que la energía obtenida registrada es considerablemente mayor para los experimentos que carecían de membrana de intercambio protónico (MIP) en concordancia con los que presentaban una configuración de cátodo expuesto al aire. Una explicación a esto es que al haber ausencia de MIP hay una mayor difusión de oxígeno que a su vez permite un mayor consumo del sustrato.

En cuanto a la preferencia de cultivos de tipo mixto o puros para su implementación en los sistemas bioelectroquímicos, se encontró que la mayoría de los autores coincidían en que a partir de los cultivos mixtos se lograba un mejor rendimiento para los sistemas debido a que responden

mejor al interactuar con sustratos de composición compleja, esto se debe a la diversidad de consorcios microbianos. Sin embargo, el uso de cultivos puros en los sistemas bioelectroquímicos han aportado al conocimiento de los diferentes mecanismos de transferencia a nivel microbiológico.

4.1.3 Condiciones de operación

Los sistemas bioelectroquímicos al ser mecanismos que basan su funcionamiento en organismos vivos como lo son los microorganismos, necesitan trabajar en condiciones óptimas de operación para hacer los sistemas más eficientes, un cambio drástico en estas condiciones puede causar desde alteraciones metabólicas hasta la muerte celular.

4.1.3.1 PH.

Ketep et al. (2012) identificaron en su experimento que el aumento del pH en el sistema en ciertos casos no genera un cambio en la generación de energía dentro de la cámara anódica, sino que ejerce acciones que producen cambios en la comunidad microbiana dominante dentro de la biopelícula. Por otra parte, Dopson et al (2016), identificaron en su experimento que en condiciones ácidas un pH aproximado de 5, ocasiona que las biopelículas empiecen a fragmentarse y las bacterias a morirse, sin embargo, se genera energía con menor eficiencia, caso contrario ocurre cuando el pH decae a valores iguales o menores que 4, donde se ocasiona la muerte celular de toda la comunidad microbiana.

4.1.3.2 Temperatura.

Influir la temperatura influye en la colonización de los microorganismos y por ende en la eficiencia de estos para producir energía. Los investigadores Liu et al (2013), y Lu et al (2011) concluyeron que la generación de metano dentro de las CCM disminuía a medida que se trabajaba el sistema a bajas temperaturas. Así mismo, identificaron que

mientras la temperatura del sistema disminuía la especie *Geobacter Chappellei* empezaba a perder dominancia y por su parte la especie que ganaba mayor protagonismo en este escenario era la *Geobacteri Psychrophilus*.

4.1.3.3 Oxígeno.

El oxígeno debe ser controlado en los experimentos dado que su presencia perjudica de forma drástica a las comunidades microbianas. El escenario ideal es asegurar que no haya oxígeno en la cámara anódica. Autores como Kiely et al. (2011), y Quan et al (2012), mostraron que la presencia de oxígeno dentro de la cámara anódica propiciaba que tanto la generación de corriente como la eficiencia coulombimétrica disminuyeran drásticamente y la oxidación de la materia orgánica fuera más rápida; de otra parte Jung y Regan (2007), mostraron que a la hora de ingresar oxígeno a la cámara anódica en las CCM la producción de energía disminuía mas no paraba, ya que especies como *Actinobacteria* empezaban a crecer significativamente sustituyendo a las α -*Proteobacteria* y *Firmicutes*.

A continuación, se presenta información sobre la influencia que tienen tres parámetros (temperatura, pH y oxígeno en la cámara anódica) sobre los diferentes sistemas bioelectroquímicos.

Tabla 4

Identificación de Efectos de las Condiciones

Parámetro de estudio	Condición	Efecto en el sistema	Referencias
	[60-25]°C	Se identifican mejores resultados en producción de energía y H ₂ . Microorganismos como <i>Escherichia coli</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> predominan a esta temperatura	(Yin et al., 2019) (Yang et al., 2015) (Call y Logan, 2008) (Kokko et al., 2018)

Temperatura	[25-15]°C	Los sistemas tienden a generar metano dentro de la cámara anódica, se ↑ la producción de energía eléctrica	(Li et al., 2019) (Khandelwal et al., 2018)
	T ≤ 15°C	↑ la cantidad de gases como el metano, a su vez, la generación de corriente (para las CCM) y la tasa de rendimiento del H ₂ (para las CEM) tiende a ↓	(Lu et al., 2010) (Lu et al., 2011)
pH	[9.5-7.5]	Ocasiona cambio de dominio de la comunidad bacteriana (de <i>Geobacter</i> sp a <i>Desulfuromonas acetexigens</i>) y ↑ la producción de energía	(Ramírez et al., 2016) (Yusoff et al., 2013) (Hidalgo et al., 2016) (Ketep et al., 2012)
	[7-5.5]	↑ la tasa de producción de H ₂ y de metano, se mantiene estable la producción de energía	(Li et al., 2019) (Fradler et al., 2014) (Mohamed et al., 2020) (Y. Zhang et al., 2011)
	[7-7.5]	↓ la producción de energía y de H ₂ , adicionalmente ocasiona desintegración de la biopelícula y muerte de la comunidad microbiana.	(Khandelwal et al., 2018) (Yang et al., 2015) (Ishii et al., 2008)
Oxigeno	Presencia	Ocasiona ↑ de oxidación de materia orgánica, ↓ índices de producción de gases como el metano y H ₂ y ↓ la producción de energía	(Jung y Regan, 2007) (Quan et al., 2012)
	Ausencia	↑ la diversidad microbiana, y la producción óptima de electrones y gases de valor agregado.	(Li et al., 2019) (Yang et al., 2015) (Fradler et al., 2014) (Mohamed et al., 2020)

-
- ↑ (Aumenta)
 - ↓ (Disminuye)

Nota: Elaborado por los Autores

Esta tabla, permite interpretar inferir el rango de temperatura, en donde es más conveniente trabajar en el rango de 25-60 °C, esto debido a que lo encontrado en la literatura para esta franja se reportan los mejores resultados en cuanto a producción de energía (CCM) y H₂ (CEM), además, de que dos de las principales especies que se encuentran en las aguas residuales (*Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*) presentan en este rango, su rango óptimo de crecimiento a esta temperatura, (Aconsa, 2020) y (Bermúdez y Bernal, 2018). En cuanto al pH se puede deducir que

el mejor rango es 7.5-8 debido a que en ese rango se encuentran resultados de producción de H_2 altos sin afectar el interior de la celda (Fradler et al., 2014) y (Mohamed et al., 2020), además (Higuera, 2014) en su trabajo muestra que en promedio el pH de las aguas residuales de la ciudad de Bucaramanga es de aproximadamente 7-8.

4.1.4 Tipos de diseño de los sistemas bioelectroquímicos

El tipo de diseño del sistema influye de forma significativa a la hora de evaluarlos ya que de ellos dependen factores como lo son el rendimiento, el tipo de productos, la velocidad de producción, los costos del montaje, entre otras. Por ejemplo, una CCM de una sola cámara con cátodo al aire implicará menos materiales y por ende costos menores que una de dos cámaras, sin embargo, la de dos cámaras entregará datos más precisos, (Sun et al., 2014).

Es fundamental configurar los diseños para lograr la mayor eficiencia de acuerdo con los análisis a efectuar para la evaluación de los sistemas bioelectroquímicos y de esta forma generar una máxima generación de energía

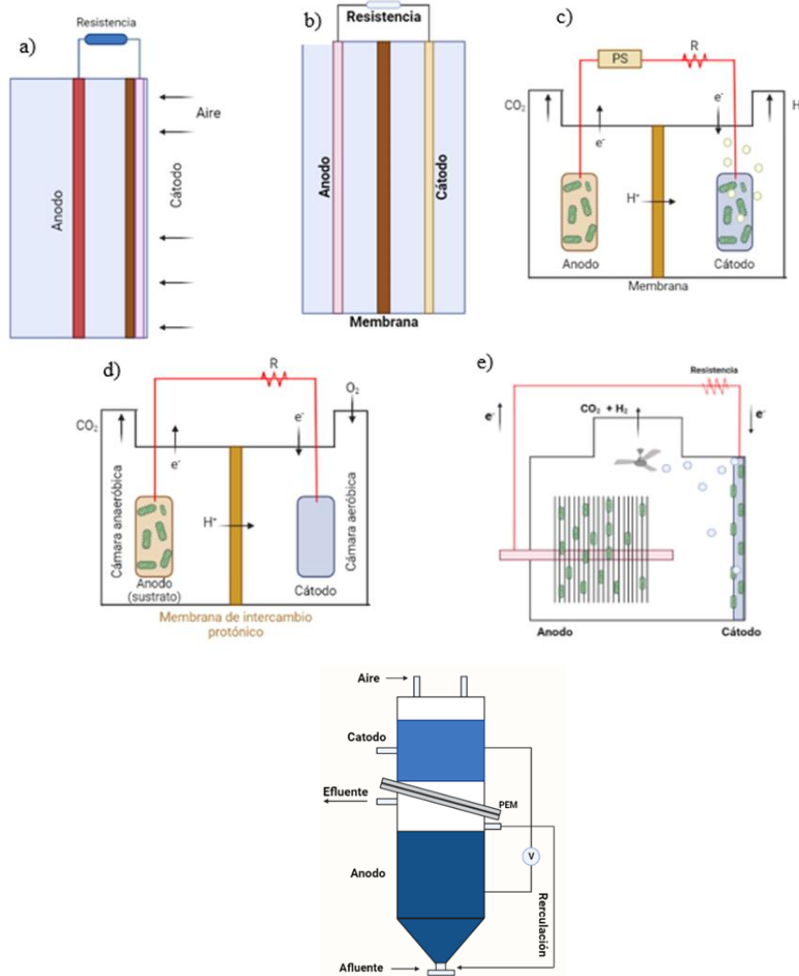
4.1.4.1 Ejemplos de diseños

Los diseños de los sistemas van de mano con los objetivos que se planteen a la hora de realizar una investigación, en experimentos que llevan a escala laboratorio por lo general se llevan a cabo en configuraciones de flujo discontinuo de doble cámara (una anódica y una catódica) separadas por una membrana de intercambio iónico o en celdas de una sola cámara con el cátodo al aire (Sun et al., 2014). esto con el fin de llevarlas a cabo en un ambiente más controlado. Para experimentos a mayor escala se llevan a cabo en Celdas de Flujo ascendente las cuales trabajan con flujo continuo, (He et al., 2017).

A continuación, se muestran algunos ejemplos de configuraciones de los diferentes sistemas bioelectroquímicos.

Figura 8

Diferentes Tipos de Diseños de Sistemas Bioelectroquímicos



Nota: a) CCM cátodo al aire; b) CCM de electrodos de barra; c) CEM de dos cámaras; d) CCM de dos cámaras; e) CCM ánodo de placas. f) CCM flujo ascendente, Elaborado por los autores.

A continuación, se muestra una recopilación de diferentes diseños propuestos en los sistemas bioelectroquímicos estudiadas en experimentos a escala laboratorio.

Tabla 5*Tipos de Diseños*

Tipo de sistema	Diseño	Tipo de operación	Producto obtenido	Referencias
CCM	3 electrodos	Semi-Discontinuo	0.35 mA/cm ²	(Tutar y Beyenal, 2021)
CCM	Cátodo al aire	Discontinuo	0.38 W/m ²	(Maleb et. al., 2013)
CEM	Monocámara	Discontinuo	3.12± 0.02 m ³ H ₂ /m ³	(Call y Logan, 2008)
CEM	Doble cámara	Discontinuo	0.28±0.04 m ³ H ₂ /m ³	(Cusick et al., 2010)
CCM	Doble cámara	Discontinuo	14±1 W/m ³	(Aelterman et al., 2006)
CCM	Doble cámara	Discontinuo	25 mW/m ²	(Rodrigo et al., 2007)
CCM	Flujo descendente	Continuo	750 ± 70 mW/ m ²	(Kim et al., 2016)

Nota: Elaborado por los Autores

De acuerdo a lo referido en la tabla anterior y a lo identificado en la literatura se puede afirmar que en lo que respecta a producción tanto la CCM como las CEM tienden a generar más producto cuando se trabajan con una sola cámara, a su vez al necesitar menos materiales para poder realizar el montaje, estos tienden a ser más económicos. Sin embargo, esta presenta problemas de aerobiosis puesto que la configuración de sus electrodos puede presentar casos en los que entre oxígeno en la cámara anaerobia (Bermúdez y Bernal, 2018). Adicionalmente, se puede evidenciar que la gran mayoría de los estudios realizados en los sistemas bioelectroquímicos en escala

laboratorio se presentan en operación batch, esto es debido a que en este tipo de operación las variables involucradas en el sistema se pueden controlar más fácilmente.

4.2 Pruebas y análisis efectuadas en los sistemas bioelectroquímicos

Las pruebas y análisis se hacen para evidenciar el desempeño de los sistemas, esto con el fin de poder evaluar el funcionamiento de estos y poder efectuar las modificaciones necesarias. Estas se llevan a cabo usando herramientas como el potencióstato, multítester, entre otros. A continuación, se muestran las principales y más recurrentes pruebas y análisis electroquímicos encontrados en la literatura.

4.2.1 Voltaje de circuito abierto

El voltaje de circuito abierto es la fuerza electromotriz que se mide cuando los electrodos no están conectados entre sí, este representa el voltaje máximo que se obtiene de una celda a una resistencia infinita la cual no tiene en cuenta las pérdidas de voltaje internas. Esto se hace con el fin de poder determinar cuál de los elementos dentro del sistema son los que generan más pérdidas, (Logan et al., 2006b). Estas pérdidas se dan principalmente por procesos metabólicos de los microorganismos y por transferencia de masa, por tanto, se espera que un experimento en donde se trabaje con cultivos mixtos se presenten más pérdidas que en uno de cultivos puros debido a que en la segunda tanto los procesos metabólicos como las biopelículas se van a formar de una forma más armónica lo que genera menos pérdidas.

4.2.2 Densidad de potencia

El cálculo de la densidad potencia como tal es el resultado del producto entre la corriente y el voltaje, sin embargo, al tratarse de microorganismos es común que los sistemas presenten cambios notables en la medición debido a cambios metabólicos, acumulación de células muertas, desgaste de los electrodos, ensuciamiento de la membrana entre otras (Sun et al., 2012), por lo

tanto, para poder comparar mejor las diferentes investigaciones es más cómodo dividir el producto de la corriente y el voltaje entre el volumen de la cámara o el área del electrodo. Este estudio se hace con el fin de poder analizar la transferencia de electrones, esto es útil principalmente en estudios que trabajen con aguas residuales ya que brinda una salida de potencia constante para estudiar aplicaciones prácticas a una escala mayor.

4.2.3 Densidad de corriente

La densidad de corriente por lo general nos provee información clave de cómo se está dando el intercambio de electrones dentro de la cámara anódica, ya que esta nos indica la velocidad en la cual se están dando las reacciones involucradas, además de que nos permite tener un parámetro preliminar para poder analizar después el rendimiento global del sistema (Sun et al., 2012). Flexer et. al. hizo pruebas con diferentes electrodos, utilizando aguas residuales, en donde después de varias pruebas descubrieron que un electrodo de carbono vítreo reticulado con nanotubos produce casi el doble de densidad de corriente que un electrodo de carbono (Flexer et. al., 2015), esto muestra que la densidad de corriente está estrechamente relacionada con el material de los electrodos mostrando resultados contundentes en cuando a la densidad de corriente se refiere a la hora de utilizar electrodos de carbono.

4.2.4 Eficiencia coulombimétrica

La eficiencia coulombimétrica se entiende como la cantidad de sustrato que se convirtió en energía eléctrica, es decir que tan buena es la actividad metabólica de las células para transformar la energía química en energía eléctrica. (Hamelers et al., 2011) indica que para que una celda de combustible microbiana pueda ser competitiva, la eficiencia coulombimétrica debe tener un valor mínimo aproximado al 80%. Este dato está fuertemente relacionado con la Demanda Química de

Oxígeno (DQO) (la cual se va a explicar más adelante) en el sentido de que a mayor sea la eficiencia coulombimétrica, menor será el DQO al finalizar el experimento.

4.2.5 Curvas de polarización

Esta es una de las herramientas más importantes a la hora de evaluar el funcionamiento tanto del sistema como tal como de cada uno de sus componentes, esto se debe a que estas curvas representan el comportamiento de corriente y el voltaje de la celda. Este procedimiento se realiza variando periódicamente la resistencia del sistema, aunque también se puede llevar a cabo con ayuda de un potenciostato (Logan et al., 2006b). Estas curvas se podrían separar en 3 regiones principales, la primera es justo después a la medición de voltaje de circuito abierto, en esta hay una fuerte caída de tensión que se debe a la activación que requieren los microorganismos para iniciar su actividad metabólica y por ende las reacciones de oxidación y reducción. La segunda zona se le denomina de pérdidas óhmicas, puesto que se le atribuyen estas pérdidas a los componentes que conforman el sistema. Finalmente, la tercera zona se conoce como concentración de polarización, en esta zona la corriente obtiene sus mayores valores y los más bajos de voltaje, esto se debe entre varias opciones a una transferencia de masa deficiente, limitación de sustrato, una velocidad de difusión baja, entre otras. Esta prueba está estrechamente ligada tanto con la densidad de corriente como la densidad de potencia, ya que con los datos de esta curva de polarización se puede obtener el punto de potencia máxima, este punto se ve influenciado principalmente del tipo de alimento que se les brinde a los microorganismos, si este sustrato es puro el punto va a ser mayor que un sustrato más complejo como lo son las aguas residuales.

4.2.6 Voltametría lineal

En esta técnica lo que se lleva a cabo es un aumento de voltaje de forma lineal a través del tiempo, esto con el fin de encontrar sitios de oxidación o reducción, esto se logra cuando la

corriente (la cual se tiene por ley de ohm con la resistencia del sistema) alcanza un pico, lo cual es generalmente útil para deducir mecanismos de electrones involucrados en reacciones electroquímicas reversibles. Autores como Cheng y Logan (2011) y Chai et al (2020) , realizaron experimentos utilizando este análisis, el primer autor identificó que al ir aumentando el voltaje en una CCM los microorganismos dejaban de producir energía y empezaban a producir metano mediante un proceso llamado electro metanogénesis. El segundo grupo investigó diferentes electrodos usando esta técnica concluyendo que para cada uno de ellos la producción de máxima de H₂ es distinta a un mismo voltaje por lo que este análisis les permitió identificar los toques de cada uno.

4.2.7 Voltametría cíclica

Esta técnica de análisis nos da información del mecanismo de transferencia de electrones extracelulares la cual nos provee de información muy importante y útil para la valoración de los diferentes sistemas, esta consiste en hacer barridos cíclicos de potencial identificando los picos de corriente los cuales indican que a ese potencial en específico hay intercambio de cargas, esto es generalmente útil cuando hay reacciones electroquímicas reversibles, lo que nos permite tener datos claves para entender el comportamiento dentro del sistema como lo son el mecanismo de transferencias de electrones y como este se ve influenciado por el electrodo con el que se trabaje (Harnisch y Freguia, 2012). Se utilizan 3 electrodos, uno de referencia, uno de trabajo y otro de contador, con ayuda de un potenciostato que modifica el voltaje nos permite crear las curvas de voltametría. Liu et al encontró en un experimento usando voltametría cíclica de comunidades mixtas que el principal mecanismo de transferencia de electrones se daba de forma directa y no por mediadores como se tenía pensado.

4.2.8 Demanda química de oxígeno (DQO)

Es la cantidad de materia orgánica que es susceptible a ser oxidada por medios químicos o biológicos, este parámetro es de suma importancia cuando se trabajan con aguas residuales ya que su incremento provoca la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, creando condiciones de “anoxia” que dañan a las comunidades biológicas de los ecosistemas acuáticos. La importancia de los sistemas bioelectroquímicos en este caso recae en la remoción de la carga orgánica encontrada en estas aguas residuales, para que posteriormente pueda ser vertido en los diferentes cuerpos de agua generando así el menor índice de contaminación posible, teniendo reducciones en varios casos de más del 70%, (Ramírez et al., 2016), (Fradler et al., 2014) y (Ketep et al., 2012).

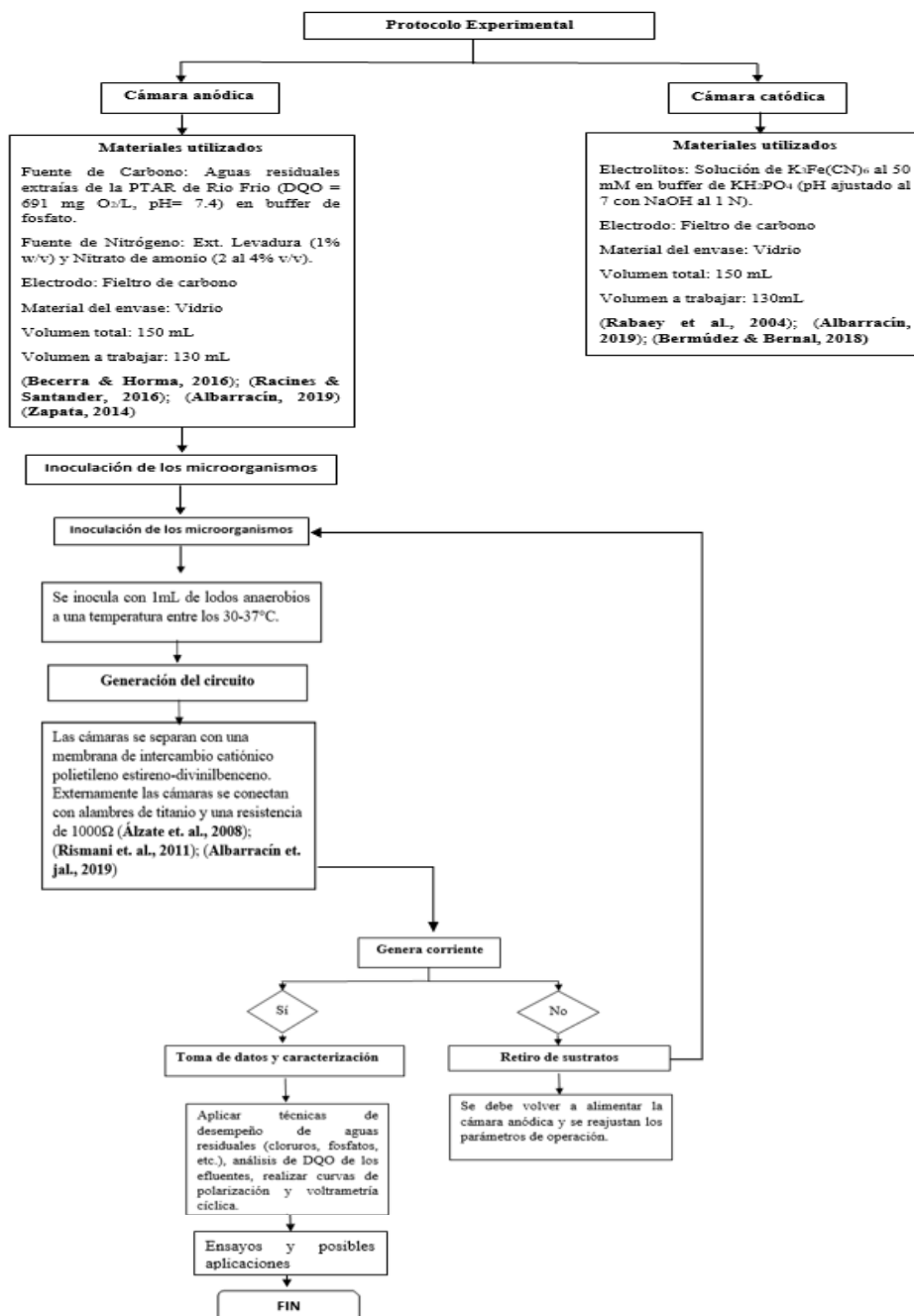
4.3 Protocolo Experimental

Se formuló una estrategia experimental tomando como referencia el trabajo previo desarrollado en el Grupo Gimba con CCM, (Albarracín et al., 2021). En este trabajo se utilizó una celda de dos cámaras, la cámara anódica fue alimentada con efluentes de la extracción del aceite de palma (POME por sus siglas en ingles), además como inóculo se tomaron microorganismos encontrados en los lodos de estos efluentes. De tres lodos estudiados, el que generó un mejor desempeño de acuerdo con las curvas de potencia y la uniformidad en la generación de corriente desde el primer ciclo fue el lodo seco, el cual es el lodo retirado del fondo de las lagunas de tratamiento de POME que se acumula en pilas secado al sol. Por tanto, con el presente trabajo, se busca dar continuidad a esta línea de estudio, proponiendo la aplicación de CCM para tratar aguas residuales domésticas del área metropolitana de Bucaramanga , para evaluar la viabilidad de este tipo de sustrato tanto para la producción de energía como para la disminución de la carga orgánica de este efluente empleando CCM.

4.3.1 Estrategia experimental propuesta para el tratamiento de aguas residuales domesticas con CCM

Figura 9

Estrategia Experimental Propuesta



Nota: Elaborado por los autores, tomado de (Becerra y Horna, 2016); (Racines y Santander, 2016) ; (Revelo et al., 2013); (Alzate et al., 2008); (Rismani et al., 2011); (Rabaey et al., 2004).

5. Conclusiones

La gran mayoría de estudios que se encuentra acerca de los sistemas bioelectroquímicos, corresponden de las celdas de combustible microbianas, con un 77% de los artículos totales analizados, además se identificó que el rango de temperatura y pH óptimos para realizar experimentos son entre 25-60 °C y un pH 7.5-5 en los análisis realizados con base en las aguas residuales, además partir de la información recopilada se puede establecer que los cultivos mixtos resultan más favorables en los sistemas bioelectroquímicos para la generación de energía dada su versatilidad.

Se evidenció que las pruebas electroquímicas más empleadas hasta la fecha fueron la voltametría lineal y las curvas de polarización, debido a que permiten observar de forma clara el comportamiento de los microorganismos ante los cambios que se le realicen al sistema y así poder evaluar cuáles son los valores más adecuados de los parámetros de este para lograr un óptimo rendimiento. Además, se pudo ver que para varios autores la remoción de DQO fue igual o mayor al 70%.

Se propuso una estrategia experimental para evaluar la viabilidad de tratar aguas residuales domésticas del área metropolitana de Bucaramanga empleando CCM, teniendo en cuenta la disponibilidad de materiales y equipos en el Grupo Gimba.

6. Recomendaciones

Se recomienda utilizar electrodos de materiales distintos a aquellos derivados del carbono para estudiar su afinidad en los sistemas bioelectroquímicos.

Dado que no se presenta información suficiente sobre la formación de la biopelícula se sugiere que, para futuras investigaciones, se indague en estudios afines de las interacciones existentes entre los electrodos y el inóculo.

Se recomienda al grupo GIMBA, continuar ampliando las investigaciones de las interacciones de comunidades microbianas con los sustratos, de modo que se identifiquen sistemas funcionales de procesos bioelectroquímicos, dado que se cuenta con el laboratorio dotado para efectuar dichos análisis.

Se recomienda para futuras investigaciones utilizar diferentes bases de datos y/o motores de búsqueda de material científico diferente a Scopus, ya que hay una gran cantidad de artículos que no se tuvieron en cuenta en esta revisión.

Referencias Bibliográficas

- Aconsa. (2020, junio 29). *Bacterias en el agua: ¿cuáles son las más habituales? ¿nos deben preocupar?* Aconsa. <https://aconsa-lab.com/bacterias-en-el-agua/>
- Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., & Verstraete, W. (2006). Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 54(8), 9-15. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.702>
- Aguilar, Mariana, Buitrón, G., Shimada, A., & Mora, O. (2016, febrero 16). Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: Factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia*, 50(2), 149-166.
- Albarracín, J. A., Yu, C.-P., Maeda, T., Valdivieso, W., & Sanchez, V. (2021). Microbial community dynamics and electricity generation in MFCs inoculated with POME sludges and pure electrogenic culture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(74), 36903-36916. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.218>
- Alzate, L., Fuentes, C., Álvarez, A., & Prada, S. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Asociación Interciencia*, 33, 503-509.
- Becerra, L., & Horna, M. (2016). Isolation of biosurfactant producing microorganisms and lipases from wastewaters from slaughterhouses and soils contaminated with hydrocarbons. *Scientia agropecuaria*, 7(1), 23-31. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>
- Bermúdez, M., & Bernal, E. (2018). *Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica*. <https://docplayer.es/114447712-Implementacion-de-una-celda-de-combustible-microbiana-a-escala-laboratorio-para-generacion-de-energia-electrica.html>

- Call, D., & Logan, B. (2008). Hydrogen Production in a Single Chamber Microbial Electrolysis Cell Lacking a Membrane. *Environmental Science & Technology*, 42(9), 3401-3406. <https://doi.org/10.1021/es8001822>
- Cao, Y., Mu, H., Liu, W., Zhang, R., Guo, J., Xian, M., & Liu, H. (2019). Electricigens in the anode of microbial fuel cells: Pure cultures versus mixed communities. *Microbial Cell Factories*, 18(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1087-z>
- Chai, H., Koo, B., Son, S., & Jung, S. P. (2020). *Validity and Reproducibility of Various Linear Sweep Voltammetry Tests of Anode and Cathode Electrodes in Microbial Electrolysis Cells. 1*, 33-45. <https://doi.org/10.20944/preprints202008.0664.v1>
- Cheng, S., & Logan, B. (2011). High hydrogen production rate of microbial electrolysis cell (MEC) with reduced electrode spacing. *Bioresource Technology*, 102(3), 3571-3574. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.025>
- Clavell, L., & Pedrique, A. (1992). *Microbiología. Manual de Métodos Generales*. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_farmacia/catedraMicro/Programa_Microbiolog%C3%ADa_2008.pdf
- Cusick, R., Kiely, P., & Logan, B. (2010). A monetary comparison of energy recovered from microbial fuel cells and microbial electrolysis cells fed winery or domestic wastewaters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17), 8855-8861. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.077>
- Datarepública. (2020, diciembre 16). *Análisis del contexto territorial de la calidad del agua en Colombia*. Cepei. <https://datarepublica.org/publica/43>

- Dopson, M., Ni, G., & Sleutels, T. (2016). Possibilities for extremophilic microorganisms in microbial electrochemical systems. *FEMS Microbiology Reviews*, *40*(2), 164-181. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv044>
- Fradler, K., Michie, I., Dinsdale, R. M., Guwy, A., & Premier, G. (2014). Augmenting Microbial Fuel Cell power by coupling with Supported Liquid Membrane permeation for zinc recovery. *Water Research*, *55*, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.026>
- Freguia, S., Rabaey, K., Yuan, Z., & Keller, J. (2008). Syntrophic Processes Drive the Conversion of Glucose in Microbial Fuel Cell Anodes. *Environmental Science & Technology*, *42*(21), 7937-7943. <https://doi.org/10.1021/es800482e>
- Guo, K., PrévotEAU, A., Patil, S. A., & Rabaey, K. (2015). Engineering electrodes for microbial electrocatalysis. *Current Opinion in Biotechnology*, *33*, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.02.014>
- Hamelers, H., ter Heijne, A., Stein, N., Rozendal, R., & Buisman, C. (2011). Butler–Volmer–Monod model for describing bio-anode polarization curves. *Bioresource Technology*, *102*(1), 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.156>
- Hari, A., Katuri, K., Gorrón, E., Logan, B., & Saikaly, P. (2016). Multiple paths of electron flow to current in microbial electrolysis cells fed with low and high concentrations of propionate. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *100*(13), 5999-6011. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7402-2>
- Harnisch, F., & Freguia, S. (2012). A basic tutorial on cyclic voltammetry for the investigation of electroactive microbial biofilms. *Chemistry, an Asian Journal*, *7*(3), 466-475. <https://doi.org/10.1002/asia.201100740>

- He, L., Du, P., Chen, Y., Lu, H., Cheng, X., Chang, B., & Wang, Z. (2017). Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(C), 388-403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.069>
- Hepler, L. (1968). *Principios de química*. Editorial Reverte.
- Hidalgo, D., Tommasi, T., Velayutham, K., & Ruggeri, B. (2016). Long term testing of Microbial Fuel Cells: Comparison of different anode materials. *Bioresource Technology*, 219, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.084>
- Higuera, N. (2014). *Diagnóstico y evaluación de la calidad de agua en la planta de tratamiento de aguas residuales Ptar de rio frio* [UIS]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/151709.pdf>
- Ishii, S., Shimoyama, T., Hotta, Y., & Watanabe, K. (2008). Characterization of a filamentous biofilm community established in a cellulose-fed microbial fuel cell. *BMC Microbiology*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-8-6>
- Jung, S., & Regan, J. (2007). Comparison of anode bacterial communities and performance in microbial fuel cells with different electron donors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 77(2), 393-402. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1162-y>
- Jung, S., & Regan, J. (2011). Influence of External Resistance on Electrogenesis, Methanogenesis, and Anode Prokaryotic Communities in Microbial Fuel Cells. *Applied and Environmental Microbiology*. <https://doi.org/10.1128/AEM.01392-10>
- Ketep, S., Bergel, A., Bertrand, M., Achouak, W., & Fourest, E. (2012). Lowering the applied potential during successive scratching/re-inoculation improves the performance of microbial anodes for microbial fuel cells. *Bioresource technology*, 127C, 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.008>

- Khandelwal, A., Vijay, A., Dixit, A., & Chhabra, M. (2018). Microbial fuel cell powered by lipid extracted algae: A promising system for algal lipids and power generation. *Bioresource Technology*, 247, 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.119>
- Kiely, P., Rader, G., Regan, J., & Logan, B. (2011). Long-term cathode performance and the microbial communities that develop in microbial fuel cells fed different fermentation endproducts. *Bioresource Technology*, 102(1), 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.017>
- Kim, K., Yang, W., Evans, P., & Logan, B. (2016). Continuous treatment of high strength wastewaters using air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 221, 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.031>
- Kimura, Z.-I., & Okabe, S. (2013). *Hydrogenophaga electricum* sp. Nov., isolated from anodic biofilms of an acetate-fed microbial fuel cell. *The Journal of general and applied microbiology*, 59, 261-268. <https://doi.org/10.2323/jgam.59.261>
- Kokko, M., Epple, S., Gescher, J., & Kerzenmacher, S. (2018). Effects of wastewater constituents and operational conditions on the composition and dynamics of anodic microbial communities in bioelectrochemical systems. *Bioresource Technology*, 258, 376-389. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.090>
- Li, M., Zhou, M., Luo, J., Tan, C., Tian, X., Su, P., & Gu, T. (2019). Carbon dioxide sequestration accompanied by bioenergy generation using a bubbling-type photosynthetic algae microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 280, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.038>

- Liu, L., Tsyganova, O., Duu, J., Chang, J.-S., Wang, A., & Ren, N. (2013). Double-chamber microbial fuel cells started up under room and low temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35), 15574-15579. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.090>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Lu, L., Ren, N., Zhao, X., Wang, H., Wu, D., & Xing, D. (2011). Hydrogen production, methanogen inhibition and microbial community structures in psychrophilic single-chamber microbial electrolysis cells. *Energy & Environmental Science*, 4(4), 1329-1336. <https://doi.org/10.1039/C0EE00588F>
- Lu, L., Xing, D., Xie, T., Ren, N., & Logan, B. (2010). Hydrogen production from proteins via electrohydrogenesis in microbial electrolysis cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 25(12), 2690-2695. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.05.003>
- Malvankar, N. S., & Lovley, D. R. (2014). Microbial nanowires for bioenergy applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.12.003>
- Martins, G., Peixoto, L., Ribeiro, D., Parpot, P., Brito, A., & Nogueira, R. (2010). Towards implementation of a benthic microbial fuel cell in lake Furnas (Azores): Phylogenetic affiliation and electrochemical activity of sediment bacteria. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, 78(1), 67-71. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2009.07.003>

- Mohamed, S., Nikhil, T., Tamilmani, J., Boobalan, T., Matheswaran, M., Kalaichelvi, P., Alagarsamy, A., & Pugazhendhi, A. (2020). Bioelectricity generation using iron(II) molybdate nanocatalyst coated anode during treatment of sugar wastewater in microbial fuel cell. *Fuel*, 277, 118119. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118119>
- Mora, A., & Bravo, E. (2016). *Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales*. 22(1), 77-84. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n1.55766>.
- Mustakeem. (2015). Electrode materials for microbial fuel cells: Nanomaterial approach. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), 22. <https://doi.org/10.1007/s40243-015-0063-8>
- Oh, S., & Logan, B. (2005). Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Research*, 39(19), 4673-4682. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.019>
- ONU. (2020, octubre 10). *Población | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Quan, X., Quan, Y., & Tao, K. (2012). Effect of anode aeration on the performance and microbial community of an air-cathode microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 210, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.009>
- Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S., Verhaege, M., & Verstraete, W. (2004). Biofuel Cells Select for Microbial Consortia That Self-Mediate Electron Transfer. *Applied and Environmental Microbiology*. <https://journals.asm.org/doi/abs/10.1128/AEM.70.9.5373-5382.2004>

- Rabaey, K., Rodríguez, J., Blackall, L. L., Keller, J., Gross, P., Batstone, D., Verstraete, W., & Neelson, K. H. (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: Electricity-driven and driving communities. *The ISME Journal*, 1(1), 9-18. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.4>
- Racines, Y., & Santander, M. (2016). *Implementación de una celda de combustible microbiano a partir de agua residual doméstica*. [Pregrado, Universidad de la Costa]. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/640/IMPLEMENTACI%20N%20DE%20UNA%20CELDA%20DE%20COMBUSTIBLE%20MICROBIANO%20A%20PARTIR%20DE%20AGUA%20RESIDUAL%20DOM%20ESTICA..pdf;jsessionid=85BA0B35DBBDA117A0FBCBA219B1DD03?sequence=1>
- Ramírez, M., Addi, H., Hernández, F., Godínez, C., De los Ríos, A., El Mostapha, L., El Mahi, M., & Lozano, L. (2016). Air breathing cathode-microbial fuel cell with separator based on ionic liquid applied to slaughterhouse wastewater treatment and bio-energy production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92, 45-50. <https://doi.org/10.1002/jctb.5045>
- Ren, Y.-X., Nakano, K., Nomura, M., Chiba, N., & Nishimura, O. (2007). Effects of bacterial activity on estrogen removal in nitrifying activated sludge. *Water Research*, 41(14), 3089-3096. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.04.028>
- Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013). Microbial fuel cells (MFCS): A challenge for the removal of organic matter and electricity generation. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Rismani, H., Christy, A., Carver, S., Yu, Z., Dehority, B., & Tuovinen, O. (2011). Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel

- cells. *Bioresource Technology*, 102(1), 278-283.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.012>
- Rodenas, P. (2020, mayo 31). *Sistemas bioelectroquímicos, herramienta de la Economía Circular en depuradoras* [Líderes en Información, Formación y Conocimiento para el Sector del Tratamiento del Agua]. AINIA.
<https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/sistemas-bioelectroquimicos-herramienta-de-la-econ-92yoF>
- Rodrigo, M., Cañizares, P., Lobato, J., Paz, R., Sáez, C., & Linares, J. J. (2007). Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 169(1), 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.01.054>
- Ruscalleda, M., & Wang, R. (2011, septiembre 15). *Bioteχνologías ambientales y relacionadas: Pila de combustible microbiana*. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/microbial-fuel-cell>
- Saldaña, R. (2020, agosto 5). *Colombia frente al tratamiento de las aguas residuales* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/rossemer-saldana-escorcia/colombia-frente-al-tratamiento-aguas-residuales>
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, 225-244.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
- Schievano, A., Sciarria, T., Vanbroekhoven, K., De Wever, H., Puig, S., Andersen, S., Rabaey, K., & Pant, D. (2016). Electro-Fermentation – Merging Electrochemistry with Fermentation in Industrial Applications. *Trends in Biotechnology*, 34(11), 866-878.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.04.007>

- Schink, B. (2001). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. <https://doi.org/10.1128/mnbr.61.2.262-280.1997>
- Sun, D., Call, D., Kiely, P., Wang, A., & Logan, B. (2012). Syntrophic interactions improve power production in formic acid fed MFCs operated with set anode potentials or fixed resistances. *Biotechnology and Bioengineering*, *109*(2), 405-414. <https://doi.org/10.1002/bit.23348>
- Sun, G., Thygesen, A., Ale, M. T., Mensah, M., Poulsen, F., & Meyer, A. (2014). The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *98*(6), 2415-2427. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5486-5>
- Tutar, S., & Beyenal, H. (2021). Enhanced bioelectrochemical nitrogen removal in flow through electrodes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*(3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101507>
- Yang, N., Hafez, H., & Nakhla, G. (2015). Impact of volatile fatty acids on microbial electrolysis cell performance. *Bioresource Technology*, *193*, 449-455. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.124>
- Yin, C., Shen, Y., Yuan, R., Zhu, N., Yuan, H., & Lou, Z. (2019). Sludge-based biochar-assisted thermophilic anaerobic digestion of waste-activated sludge in microbial electrolysis cell for methane production. *Bioresource Technology*, *284*, 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.146>
- Yusoff, M., Hu, A., Feng, C., Maeda, T., Shirai, Y., Hassan, M., & Yu, C. (2013). Influence of pretreated activated sludge for electricity generation in microbial fuel cell application. *Bioresource Technology*, *145*, 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.003>

- Zhang, W., Zhu, S., Luque, R., Han, S., Hu, L., & Xu, G. (2016). Recent development of carbon electrode materials and their bioanalytical and environmental applications. *Chemical Society Reviews*, *45*(3), 715-752. <https://doi.org/10.1039/C5CS00297D>
- Zhang, Y., Min, B., Huang, L., & Angelidaki, I. (2011). Electricity generation and microbial community response to substrate changes in microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *102*(2), 1166-1173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.044>