

**USO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO COMO TÉCNICA ALTERNATIVA PARA
LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN DE ENERGÍA: REVISIÓN**

MARIA DEL MAR MEDINA PANTOJA

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, 11/10/2022**

**USO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO COMO TÉCNICA ALTERNATIVA PARA
LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN DE ENERGÍA: REVISIÓN**

MARIA DEL MAR MEDINA PANTOJA

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director

JENIFFER KATERINE CARRILLO GÓMEZ

Magister en Controles industriales

PhD (c). En Automática

PhD (c). Tecnologías para Nanosistemas, Bioingeniería y Energía

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, 11/10/202

Dedicatoria

Dedico este camino por que es más que un trabajo, a mi mamá que siempre estuvo en sus oraciones, a papá que cada día se levantó por nosotros y nunca escuche de él un “no puedo”, a mis hermanos por ser fortaleza para dar cada paso con certeza.

Maria del Mar Medina Pantoja

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de la vida.

A la Universidad que me ha ofrecido una academia indescriptible tanto profesional como personal, a cada uno de mis maestros a lo largo de esta carrera, en especial al profesor Guillermo Restrepo Rubio que en primer semestre hizo que nos enamoráramos de nuestra carrera, al Ing. Alexander Luna por cada consejo profesional y preciso para avanzar en mi carrera, a mi directora de trabajo de grado por la paciencia y el esfuerzo puesto.

A mis padres por cada acto de amor hacia mí, por cada llamada llena de fuerza y vida.

CONTENIDO

1. RESUMEN	7
2. ABSTRACT	7
3. INTRODUCCIÓN	8
4. OBJETIVOS	9
4.1 Objetivo General	9
4.2 Objetivos específicos.....	9
5. Marco referencial.....	10
5.1 Marco teórico	10
5.2 Celdas de Combustibles Microbiano: Evolución.....	11
5.3 Diseños básicos y tipos de celdas de combustibles microbianas basados en sus configuraciones	12
5.3.1 Diseño de una celda de combustible microbiano.....	12
5.3.2 Componentes de una celda de combustible microbiano	13
5.4 Configuraciones de CCM	18
5.4.1 Definición De Celdas De Combustible Microbiano	18
5.5 Parámetros operativos que influyen en CCM	22
5.5.1 pH.....	22
5.5.2 Temperatura.....	23
5.5.3 Sistema Batch o Sistema Continuo	24
5.5.4 Caudal y tiempo de retención hidráulica	24
5.5.5 Resistencia Externa	25
5.5.6 Concentración inicial.....	26
5.5.7 Nitrógeno	26

5.6	Efecto entre los parámetros de LAS CCM	27
5.7	Microorganismos Y SUSTRATOS utilizados para la remoción de contaminantes en ccm	29
5.7.1	Microorganismos en la cámara anódica	31
5.7.2	Microorganismos en la cámara catódica	32
5.7.3	Sustratos.....	32
5.8	COMPARACIÓN EN SISTEMAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO	33
5.9	DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD en CCM.....	34
5.9.1	Degradación de metales tóxicos en CCM.....	34
5.9.2	Degradación de contaminantes utilizando colorantes orgánicos en CCM	38
6.	COMPARACIONES ENTRE CCM	41
7.	TECNOLOGÍAS PRESENTES Y FUTURO DESARROLLO en CCM.....	42
7.1	Estado del arte.....	42
8.	CONCLUSIONES.....	50

1. RESUMEN

Como objetivo principal se realizó una revisión dando a conocer aspectos relevantes sobre la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales utilizando celdas de combustible microbianas (MFC, por sus siglas en inglés). Las celdas de combustible microbianas en la actualidad se ha resaltado como una tecnología emergente ya que han desarrollado una solución a dos problemáticas latentes como es el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía. Se realiza una revisión de investigaciones que se han venido ejecutando en la última década, se abordaron temas como su clasificación, componentes, mecanismos de funcionamiento, actividad microbiana y materiales de los electrodos.

Palabras clave: Celdas de combustible microbianas, agua residual, generación de electricidad, electrodos, microorganismos.

2. ABSTRACT

The main objective is to carry out a review revealing relevant aspects about the generation of electrical energy and the treatment of wastewater using microbial fuel cells (MFC). Microbial fuel cells have currently stood out in the emerging technology because they have developed a solution to two latent problems such as wastewater treatment and power generation. A review of research that has been produced in the last decade is carried out and topics such as its classification, components, operating mechanisms, microbial activity and electrode materials are addressed.

Keywords: Keywords: Microbial fuel cells, wastewater, electricity generation, electrodes, microorganisms.

3. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional requiere expansión urbana, agrícola, producciones a escala de productos industriales (Franks & Nevin, 2010) que requieren materias primas como hidrocarburos, fuente no renovable energéticamente, el agotamiento de recursos de combustibles fósiles y sus efectos de calentamiento global han redirigido a los científicos hacia la biomasa como fuente sostenible de producción de energía, la biomasa es un recurso renovable y tiene como característica principal que su ciclo de carbono es cíclico, esta biomasa se utiliza en una tecnología emergente e investigada en profundidad en el último siglo para escalarla a producción industrial, las celdas de combustible microbiana (MFC) por sus siglas en inglés, son biorreactores que utilizan microorganismos como catalizadores para reaccionar por medio de oxidación compuestos orgánicos e inorgánicos.

Dentro del marco de objetivos se propone de manera general, dar a conocer aspectos relevantes de las celdas de combustible microbianas en la aplicabilidad de aguas residuales y la generación de energía eléctrica; también se abarcó específicamente enfocándose en los parámetros principales en los cuales se opera, como estos afectaron favoreciendo la remoción de contaminantes de aguas residuales y generación eléctrica, otro aspecto es la aplicación en procesos de remoción y sus eficiencias al momento de utilizar estas tecnologías.

Se justificó debido a que la tecnología utilizada al ser un tema novedoso aún tiene pocas investigaciones al respecto, por lo que esta revisión sistemática proporciona una visión general de los estudios en este campo, los principales hallazgos y métodos utilizados en las investigaciones, y así brindar información a futuros investigadores.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión bibliográfica del uso de Celdas de Combustible Microbiano como técnica alternativa para la depuración Aguas Residuales y generación de energía.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las diferentes configuraciones de celdas de combustibles microbiano.
- Describir los factores que afectan el rendimiento de la celda de combustibles microbiana en el proceso de tratamiento de aguas residuales y generación de la energía.
- Evaluar los diferentes sustratos usados en la celda de combustibles microbiana.
- Realizar una comparación entre las celdas de combustible microbiano y los métodos convencionales usados para la depuración del agua residual.
- Describir el panorama actual del uso de celdas de combustible microbiano para generar energía eléctrica y su tratamiento de aguas residuales.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO TEÓRICO

El crecimiento de la población mundial, las construcciones a grandes escalas en la urbe, el desarrollo tecnológico, industrial y agrícola que se ha evidenciado en el mundo ha traído consigo unos altos niveles de contaminación ambiental. (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021) El consumo de la población y las necesidades de la humanidad han conducido a las industrias al uso de combustibles fósiles, causando efectos al calentamiento del planeta y altos índices de contaminación por sus derivados, direccionando a la ciencia a buscar nuevos métodos renovables, llevando a los investigadores a centrarse en la biomasa como un recurso sostenible de producción energética y de ciclos de carbono cerrados. (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021). Esta investigación se enfoca en una tecnología sobresaliente para la producción de bioenergía como lo es la celda de combustible microbiana (MFC). (Saba et al., 2017)

Las celdas de combustibles microbianas (MFC) son una tecnología en auge que su principal materia prima es la utilización de microorganismos que cumplen funciones de aceleradores orgánicos, convirtiendo directamente la energía química que se encuentra en su interior como materia orgánica o biomasa a energía eléctrica. Estas celdas utilizan diversos sustratos, fermentables y no fermentables, dentro de los sustratos fermentables encontramos algunos como: glucosa, xilosa y sacarosa (Wetser et al., 2015) y dentro de los no fermentables: acetato, butirato, entre otros que se encuentran en investigación y desarrollo. (Wetser et al., 2015).

A continuación se abordó como las celdas de combustibles microbianos han evolucionado (Franks & Nevin, 2010).

5.2 CELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANO: EVOLUCIÓN

1791, Luigi Galvani médico y físico de Italia se encontraba investigando acerca de electricidad y como esta influenciaba los tejidos.

1791, Luigi Galvani acuña el termino bio-electricidad dado sus estudios.

1838, William Robert Grove físico y abogado de Reino Unido, este científico galés desarrollo en una celda recubierta de zinc amalgamada en ácido sulfúrico diluido, dentro de esta un cátodo de platino en ácido nítrico concentrado, entre ellos existía una vasija de cerámica porosa que en promedio transfería 12 Amperios de corriente con un voltaje de 1,8 voltios.

Esta celda se nombró “Celda de Grove” (Elements, 2019).

1893, FriedrichWilhem Ostwald científico que desarrollo y fue precursor dentro de la química física, en sus experimentos determinó: electrodos, electrolitos, agentes oxidantes, reductores, aniones y cationes (Elements, 2019).

1910 – 1911, Michael Cresse Potter siendo profesor de Botánica en medio de sus investigaciones encontró que existían organismos que eran dadores de energía y al tiempo producían voltaje en el momento en el que degradaban compuestos orgánicos.

Siguiendo los pasos de Ostwald, cuando experimentaba con cultivos celulares de *Saccharomyces* y *Escherichia Coli* descubrió energía eléctrica con electrodos de platino.

1999, M.J. Allen y H. Peter Bennetto en Reino Unido explico su descubrimiento a la ciencia mundial cuando con celdas de combustibles biológicas mejoradas creo energía con microbios con velocidades de reacción altas y eficiencias en transferencia de electrones (Elements, 2019).

5.3 DISEÑOS BÁSICOS Y TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANAS BASADOS EN SUS CONFIGURACIONES

Las celdas de combustible microbiano han venido aumentando su auge y afianzándose en el campo tecnológico desde que Potter en 1911 descubrió que la degradación de contaminantes se podría hacer con microbios (Yaqoob et al., 2020).

Las celdas de combustibles microbianas tienen un diseño básico y similares entre sí, ánodo, cátodo, sustrato y electrolitos, clasificándose según su configuración de cámara sencilla, de cámara dual y celdas de combustible microbiano apilados. La configuración ideal es una cámara doble que incluye dos celdas, una catódica y otra anódica, entre ellas existe una membrana protónica, su función principal es transportar los protones de la cámara del ánodo a la cámara del cátodo (Elements et al., n.d.)

5.3.1 Diseño de una celda de combustible microbiano

Para explicar el diseño a modo general utilizamos una cámara de doble cámara. Ésta consta de cámara anódica anaerobia y una cámara catódica aerobia que en su mayoría están hechas de vidrio, policarbonato o plexiglás, con sus electrodos respectivos que pueden ser de grafito, filtro de grafito, platino, negro de platino, carbón vitreo reticulado, papel carbón, entre otros compuestos que a tecnología en medio de sus avances ha experimentado y desarrollado para lograr mayores eficiencias en la producción energética (Elements, 2019).

Como materia prima se utilizan componentes de procedencia orgánica, los microorganismos metabolizan esta materia orgánica liberando protones y electrones todo esto ocurre en la cámara anódica, los electrones viajan hacia un aceptor de electrones y los protones se dirigen hacia la membrana de intercambio protónico (PEM, NAFION o ULTREX) (Elements et al., n.d.).

Los electrones se dirigen hacia la cámara catódica la cual contiene un aceptor de electrones de alto potencial para completar el circuito. El oxígeno cumple su función como aceptor de electrones y como agente oxidante simplificando la operación de la celda, otras cámaras utilizan ferricianuro como agente aceptor de electrones, aunque en investigaciones se ha demostrado que existen agentes biológicos adicionales (Ezziat et al., 2019)

5.3.2 Componentes de una celda de combustible microbiano

Los materiales de los cuales cada componente de las celdas está compuesta es un desafío en términos económicos y de eficiencia, seleccionar adecuadamente se puede ver reflejado en la densidad de potencia y en la eficiencia Coulómbica.

5.3.2.1 Electrodo

Los electrodos son unos de los componentes claves para el desarrollo eficiente de la celda de combustible microbiana, su diseño específico permite que esta tecnología signifique factibilidad económica y energética.

Se clasifican en dos grupos: bio-electrodos (bio-ánodo y bio-cátodo) y electrodos químicos (cátodos aireados y cátodos aireados en fase acuosa) (Soemari et al., 2020) todo esto depende de qué tipo de bacterias utilice la celda. Un buen material para el electrodo ha de ser aquel que en sus características sea conductor, estable, resistente y en algunos casos económicamente viable.

Los bio-electrodos cumplen la función adicional como cocreadores de biopelículas de biomasa, deben ser bio-compatibles y tener características fisicoquímicas como rugosidad elevada y transferencia de electrones eficiente (Soemari et al., 2020).

5.3.2.2 Ánodo

En el ánodo ocurre la oxidación del sustrato y este libera electrones como efecto de la respiración que realiza, el ánodo es ubicado en la cámara anaerobia con el fin de minimizar la inhibición de generación eléctrica, esto se realiza de esta manera ya que el oxígeno como agente oxidativo y aceptor final de electrones actuaría en la respiración microbiana antes que el electrodo, provocando una recepción de energía eléctrica.

Los materiales en los que se encuentran estos electrodos son metálicos en malla de acero de acero inoxidable no corrosiva y el material más utilizado es el carbón, encontrado comercialmente como placas de grafito compacto barras o gránulos,, se encuentran los ánodos de carbón en diferentes presentaciones tales como papel, fibra, tela, entre otros (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008)

5.3.2.3 Cátodo

Según el circuito los electrones llegarán al cátodo de manera externa por medio de un material conductor no corrosivo (Ñacato Chicaiza Dayanna Carolina; MSc. Raúl Alfonso Bahamonde Soria, 2018), los protones se transportan a través de una membrana de intercambio y finalmente entran a una cámara aerobia en la cual hacen contacto con oxígeno circundante provocando una reacción química que da como resultado agua, el oxígeno es el elemento con mayor viabilidad debido a varios factores, se encuentra en el medio ambiente el cual puede ser aprovechado eficazmente, no requiere regeneración, no representa efectos tóxicos para la biomasa. Los materiales en los que se encuentran suelen ser iguales a los del ánodo; los cátodos pueden estar configurados en la celda a conveniencia del investigador y de acuerdo al objetivo de la investigación, estas pueden ser: cátodos expuestos al aire, cátodos expuestos al aire en fase acuosa y bio-cátodos.

Los cátodos que comúnmente son utilizados en laboratorio como prueba son en fase acuosa y de exposición al medio ambiente, los cátodos de exposición al medio ambiente consisten en una capa de difusión, un material conductivo de soporte y una capa con catalizador que va expuesta a líquido en su preferencia agua (Soemari et al., 2020).

Los cátodos expuestos al aire en fase acuosa suelen ser de características similares (Huan et al., 2014), estos en particular tienen un sistema de aprovechamiento del oxígeno que es inyectado como aire a una solución acuosa. Se da una diferencia en la solubilidad del oxígeno en el aire y en el agua, estos diseños con el cátodo expuesto al aire en términos económicos tienen mayor viabilidad ya que no necesita aireación y su gasto energético se ve disminuido, por ello se alcanzan en comparación densidades de potencia, elevadas (Slate et al., 2019).

5.3.2.4 Membrana

La membrana cumple una función fundamental y es que el agente oxidante reaccione con el ánodo como aceptor final de electrones, dividiendo la celda en dos: cámara anódica donde los microorganismos reaccionan con el ánodo creando la bio-película y la cámara catódica donde se encuentran los electrones con el catolito.

Las celdas de combustible microbiano con configuración de cámara sencilla han reportado grandes densidades de potencia en ausencia de membrana se cree que en ausencia de la membrana de intercambio podría incrementar la difusión de oxígeno y sustrato.

Para reducir efectos difusión de oxígeno se propone espaciar los electrodos dando como resultado un incremento de la resistencia interna. Las desventajas notorias que presenta la celda de cámara sencilla es su acelerada perdida de sustrato por medio de difusión, la acumulación de biomasa en el electrodo receptor disminuyendo su eficiencia y deteriorándolo a largo plazo la celda. Cuando su materia prima es de composición compleja y los cátodos están expuestos a interfaces óxicas/anóxicas se crea un ambiente de proliferación microbiana favorable.

Aunque, cuando se utiliza membrana de intercambio protónico esta tiene una difícil transferencia de protones entre cámaras y esto conlleva a un gradiente de pH la primera cámara teniendo un pH ácido y la segunda un pH alcalino, disminuyendo la estabilidad al proceso disminuyendo el desempeño electroquímico (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008), una solución a estas problemáticas fue la membrana de intercambio catiónico, siendo esta la más utilizada ya que debido a que contiene grupos sulfonados cargados negativamente en su superficie adhieren a los cationes y estos son transportado con mayor facilidad.

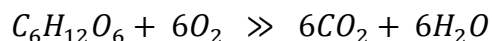
5.3.2.5 Tipos de microorganismos

Los procesos en los cuales los microorganismos son el protagonista atrae la comunidad científica dado su autosostenibilidad catalogándose de uso en la producción de bioenergía , los microorganismos se caracterizan por que son resistentes a la temperatura, específicamente microorganismos psicrófilos (Rinardo, 2018) .

Se han alimentado a la cámara cultivos mixtos y cultivos puros, los cultivos puros tienen una característica en su eficiencia Coulómbica y la producción de electro-cables incrementando el contacto físico del microorganismo con el electrodo, siendo un efecto notable el incremento de la densidad de potencia.

Los microorganismos al momento de metabolizar su alimento, aprovechan la energía de la oxidación, por ejemplo, la glucosa en presencia de oxígeno produce dióxido de carbono y agua, a continuación, la reacción (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008):

Reacción en medio aerobio:



Los carbohidratos se oxidan en ausencia de oxígeno al momento en el que los electrones son liberados por reacciones enzimáticas, los electrones son conservados a través de la reacción para luego cumplir una función de intermediario para luego ser reducidos. Por medio de reacciones biosintéticas los electrones conservan energía con el objetivo de su perdurabilidad y crecimiento.

La reacción en la cual se involucra la oxidación puede darse en un ejemplo de glucosa por un microorganismo anaerobio, a continuación, veremos la reacción:

Reacción en medio anaerobio:



El proceso en ausencia de oxígeno, parte desde los electrones los cuales por medio de un mediador en este caso de tipo redox son expulsado de su cadena entrando en la membrana celular, reduciéndose. El mediador que estará cargado de electrones transportará los electrones hacia el electrodo (ánodo) y este transportará por un medio de un circuito eléctrico la energía recolectada hasta llegar a un segundo electrodo cargado positivamente que cumpliría la función de aceptor de electrones siendo este un aceptor externo biológico (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008) .

La siguiente tabla (Tabla 1) enlista los tipos de electrodos que se utilizan en la cámara catódica y en la cámara anódica, llegando a la conclusión que dada la calidad del electrodo las densidades de potencia son las adecuadas para un amplio funcionamiento de la celda. La tabla justificó que, a mejor material en los electrodos, los parámetros que pueden influir sobre la celda son controlados, por ejemplo, el pH, obteniendo mejores resultados para la generación de electricidad en la celda de combustible microbiana.

Tabla 1. Tipos de Electroodos usados, Microorganismos y densidades de potencia

<i>Tipos de electrodos</i>		Microbios	Densidad de Potencia (mW/m ²)
Ánodo	Cátodo		
Papel carbón normal	Papel carbón normal	C. acetobutylicum y C. Thermohydrosulfuricum	7.18
Carbon activado	Tela de carbón hidrófobico	Proteus hauseri ZMd44	103
Filtro de Grafito	Filtro de Grafito	Acetobacteruuaa, B-Proteobacteria	/
Platos de grafito	Mallas de Platino	Shewanella oneidensis	1410
Tela de carbón activado	Lámina de grafito	D. desulfurisers	0.51
Tela de carbon/Grafeno	Tela de carbón	P. Aeruginosa	52.5
Carbon activado	Tela de carbón	/	1.7
Filtro de Grafito	Varilla de grafito	Shewanella oneidensis MR-1	32.5
Carbon activado granulado	Malla de acero inoxidable	Geobacter Sulfurreducens y Beta Proteobacteria	610
Papel de carbon/hoja de Grafeno	Tela de carbón	S. Oneidensis MR-1	610
Redes de polianilina (PANI) sobre nanocintas de grafeno (GNR) recubiertas de papel carbón	Papel de carbón	S. Oneidensis MR-1	856
fieltro de carbono	/	E. coli	0.98
Papel de carbón	Papel de carbon con Pt como catalizador	Shewanella oneidensis MR-1	158.1
rGO/SnO ₂ /compuesto de tela de carbón	Platino	E. Coli	1624
Electrodo compuesto magnético recubierto de polímero	Papel carbon Toray	Synechococcus sp.	4.9 ± 0.5
Tela de carbono/Grafeno reducido/polipirrol	Papel de Carbón	E. Coli	1068
Papel de Carbón	Papel de Carbón	Klebsiella sp. MC-1	412
Pt/Grafito	Pt/Grafito	Shewanella genus	/
Papel de Carbon/Nanohojas de grafeno dopadas con N	Papel de carbon	E. Coli	1008
Papel de Carbón/Grafeno	Papel de carbón	S. Putrefaciens CN32	679.7

Elaborada por: (Yaqoob et al., 2020)

5.4 CONFIGURACIONES DE CCM

Se han propuesto configuraciones de celdas de combustible microbiano con el objetivo de mejorar las densidades de potencia, la estabilidad en el sistema disminuyendo así los efectos adversos que genera esta, creando así celdas de cámara sencilla, celdas de dos cámaras, celdas tubulares, celdas en conjunto (serie o paralelo), celdas alimentadas en flujo continuo, de sedimentos, acondicionadas a humedales, entre otras...

Se abordó el tema de las principales celdas, ya que su principio de funcionamiento sigue siendo el mismo.

5.4.1 Definición De Celdas De Combustible Microbiano

Se podría definir una celda de combustible microbiana (MFC) de sus siglas en inglés, como el medio por el cual la actividad catabólica de microorganismos que produce la materia orgánica genera electricidad. Esta materia orgánica es oxidada en el ánodo, por microorganismos que electroquímicamente son activados y generan electrones; los electrones que se excitan, se liberan hasta el cátodo por un circuito externo, generando así electricidad. (Slate et al., 2019).

A lo largos de los años y de numerosas investigaciones en modelos para celdas de combustible microbianas se pueden definir dos modelos principales, cámara dual o bicameral y de cámara sencilla o unicameral, Figura 1 y Figura 2.

5.4.1.1 Diseño de cámara dual en celdas de combustible microbiano

El diseño de cámara dual o bicameral como su nombre lo dice se divide en dos cámaras, una cámara anódica anaeróbica y una cámara catódica aeróbica, separadas entre si por una membrana de intercambio protónico (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021). Se alimenta la materia prima a la cámara anódica en la cual se encuentra el electrodo en ausencia de oxígeno, las bacterias del sustrato recubren el electrodo anódico liberando electrones y protones. Las cámaras de encuentran interconectadas por una membrana protónica por la cual viajan los protones, ocurriendo una reacción por oxidación al momento en el que los protones y electrones se encuentran en la cámara catódica (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021) **Figura 1.**

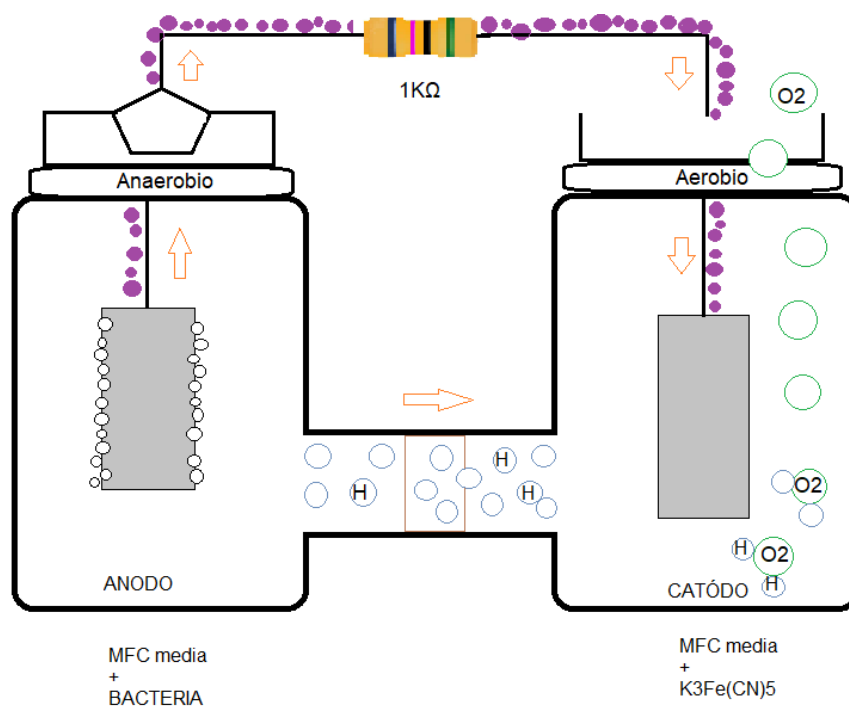


Figura 1. Diagrama esquemático de MFC de dos cámaras. Elaboración propia.

5.4.1.2 Diseño de cámara sencilla en celdas de combustible microbiano

Las celdas de combustible microbiano de una sola cámara tienen características que podrían considerarse como ventajas sobre las celdas de cámara doble, como vemos en la figura 2 la mayoría de las celdas de cámara sencilla utilizan oxígeno como aceptor de electrones, como vemos en este caso la membrana y el cátodo tienen contacto directo con el aire. Su funcionamiento se rige por la producción de electrones por los exoelectrógenos que se transportan a través del circuito hacia el cátodo, donde ellos forman parte de la reacción que ocasiona la conversión de oxígeno a agua. Las primeras celdas de cámara sencilla con electrodos de grafito se realizaron en el año de 2003 (Tamboli & Eswari, 2018). Se utilizó, cátodo de grafito Fe^{+3} , ánodo de grafito Mn^{4+} y grafito tejido rojo neutro y *E. Coli* como biocatalizador (Tamboli & Eswari, 2018).

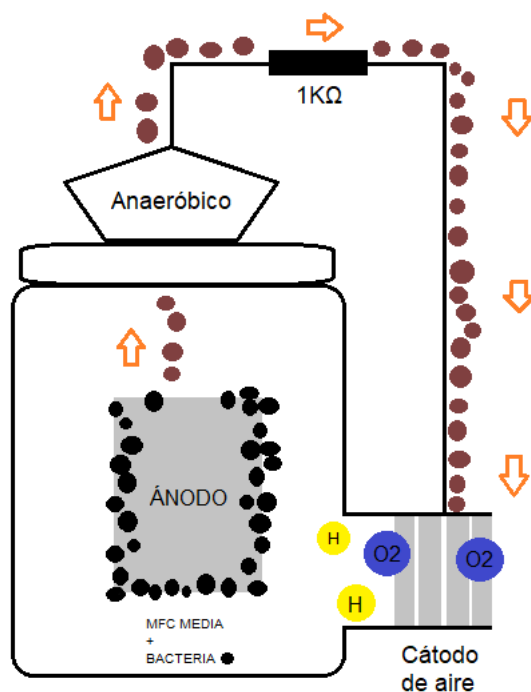


Figura 2. Diagrama esquemático de MFC de cámara sencilla. Elaboración Propia.

5.4.1.3 Celdas de Combustible Microbianas Apiladas

Este tipo de configuración forman una especie de batería ya que las celdas son apiladas en circuitos en serie o paralelo, el tipo de circuito en serie produce un incremento en el voltaje y cuando las celdas son apiladas en paralelo la generación de corriente es mayor. Los tipos de apilamientos pueden darse en el electrodo, la dirección de la pila es un factor fundamental que ha sido variable con el fin de investigar sus respuestas, se han hecho investigaciones con apilamientos horizontales y verticales, la forma del reactor, el método de conexión y la modulación afectan la eficiencia del producto que se espera de la celda (Elements et al., n.d.)

- Celdas apiladas de electrodos bipolares

Estas celdas a lo largo de los años han evolucionado, originariamente consistían en una cámara de ánodo, un electrodo bipolar, una membrana, una cámara de cátodo y placas en los extremos similares a una pila de celdas de combustible PEM (Elements et al., n.d.).

Algunas de las ventajas que presenta esta configuración es:

- Los contactos eléctricos que presenta minimizan pérdidas por resistencia interna.

- Las pérdidas de voltaje son mínimas comparadas con las celdas convencionales.
- Su fabricación es factible.

El diseño que se presenta en la figura 3 está compuesto por dos compartimientos anódico y catódico, una membrana de NAFION que ha sido recubierta por Pt/C en uno de sus lados.

-Celdas de combustible microbiano Apilada Horizontal

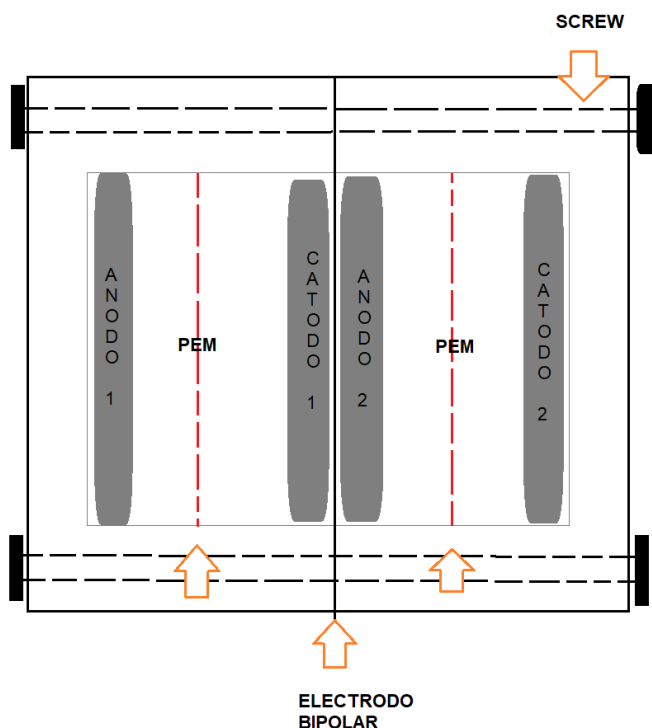


Figura 3. Diagrama de una celda de combustible microbiana apilada

Cuando se crearon las primeras celdas, estas fueron construidas de forma horizontal y una de sus características era su falta de electrodos bipolares.

En la actualidad las celdas son unidades apiladas horizontalmente que se encuentran interconectadas a colectores de corriente, y tienen configuraciones eléctricas en serie o paralelo. Para realizar las particiones de la unidad apilada los materiales más utilizados son en acrílico o láminas de caucho (Elements, 2019).

Este tipo de configuración suele ser una de las más económicas de construir, dada su modulación

simple, escalabilidad y adicional tiene una distribución de la biomasa que facilita y la hace mucho más rentable y de uso continuo. Sus desventajas es la concentración tan baja a la que llega finalizando el proceso, disminuyendo la densidad de eléctrica (Elements et al., n.d.).

- Celdas de combustible microbiano multicámara

Estas celdas en particular en el campo científico tienen literatura escasa. En el año de 1962 se construyó una celda multicámara (Tamboli & Eswari, 2018) empleando una configuración de 3 cámaras, dos cámaras que contenían electrodos y un compartimiento en la zona externa que lo utilizaban como zona de seguridad para algún fallo inoportuno, cada compartimiento se encontraba separado el uno del otro por membranas de diálisis, se alimento a los sistemas glucosa-glucosa oxidas, glucosa-E.Coli, etano-Norcadia y glucosa-Norcadia.

5.5 PARÁMETROS OPERATIVOS QUE INFLUYEN EN CCM

Los parámetros operativos de las celdas son un aspecto fundamental en los sistemas de celdas ya que de ellos dependen su rendimiento y eficiencia, estos parámetros dependen de los compuestos que trae consigo las aguas contaminadas, algunos de estos parámetros son: pH, temperatura, la tasa de carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica, el flujo, la resistencia externa y por ultimo cómo se comporta la celda en estado estacionario o continuo, a continuación se profundizó en algunos parámetros (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

5.5.1 pH

Uno de los parámetros más importantes es sin lugar a duda el pH, este afecta directamente la producción de electrones y protones en la cámara, afectando así el rendimiento de la celda. Uno de los puntos a favor de tener un pH elevado son los valores medidos adecuados de la densidad de corriente generada y la eficiencia culómbica, ya que facilita la transferencia de electrones, así mismo los valores medidos de DQO.

Según la literatura un pH óptimo es de 7 u 8 (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021), favoreciendo la actividad microbiana, regular la acidez o alcalinidad del medio permite evitar efectos adversos en las celdas de combustible microbiano, cuando la materia prima tiene un pH sobre valores de 7, en el proceso de remoción de contaminantes y generación eléctrica su pH

aumenta dado el intercambio protónico a través de la membrana, favoreciendo las reacciones en el cátodo, teniendo en cuenta que aquí es donde ocurre la oxidación (Huan et al., 2014).

Las celdas de combustible microbiano tienen características y son alimentadas y operadas según el tipo de sustrato, su nivel de acidez y según la configuración de la celda, esta tecnología electroquímica ha permitido enfrentar desafíos en las densidades de potencias que se obtienen, a continuación la tabla 1 muestra algunos tipos de sustratos, la configuración de la celda y el comportamiento del pH en ellas, dando como resultados densidades de potencia dispuestas a evaluarse para optimizarse o en su defecto mejorar el proceso de depuración de aguas y generación eléctrica.

Tabla 1. Densidades de potencia a diferentes valores de pH

<i>Densidades de potencia a diferentes valores de pH</i>			
Configuración de CCM	pH	Sustrato	Densidad de potencia (Mw/m ²)
Cámara dual, anodo en cerámica	8	Aguas residuales de molino de arroz	48.84
	7		32.63
	6		23.43
Cámara dual, Nafion como PEM	8	Aguas residuales de molino de arroz	15.57
	7		6.03
	6		2.88
Cámara dual	7	Lodos depurados en ausencia de O ₂	8
Cámara dual	4	Acidiphilium Cryptum	12.7
Cámara dual	7	Geobacter Sulfurreducens	14.7
Cámara dual	7	Aguas residuales	20
Cámara dual	7	Rhodoferax ferrireducens	33
Cámara dual	7	P. Vulgaris	32
Cámara sencilla, cátodo de aire	8	Cultivo mixto de bacterias	87.2
	10		107.1
	9		Valor más alto
	5		Valor más bajo

Fuente: Elaborado por (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021)

5.5.2 Temperatura

La temperatura es el parámetro que permite a la celda tener digestión y una completa descomposición microbiana en ausencia de oxígeno, los microorganismos poseen una tolerancia a la temperatura y esta ha sido catalogada como temperatura mesófila (Rinardo, 2018) la cual se encuentra en un rango de 35° a 40°C (Peralta et al., n.d.), el proceso ideal se lleva a cabo en este rango, cuando los valores superan o se encuentran por debajo del intervalo de temperatura estipulado la actividad microbiana disminuye notablemente, en un rango de temperatura alto se han encontrado desempeños satisfactorios en producción de electricidad, cabe resaltar que los sistemas anaeróbicos presentan eficiencias razonables en comparación a otros sistemas con rangos de temperaturas bajas entre los 4° y 15°C (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021). Se han llevado a cabo estudios los cuales han demostrado producción de consorcios anódicos electroactivos, los cuales debido a sus condiciones han mostrado bajos estándares de DQO, operando la celda a temperaturas menores a 5°C (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021). También, diversas investigaciones han logrado obtener resultados en rangos de temperatura de 10° a 33°C dando como resultado densidades de corriente con picos pero en descenso en rangos de temperatura entre los 43° y 55°C (Peralta et al., n.d.).

5.5.3 Sistema Batch o Sistema Continuo

Si bien se han examinado los tres tipos de sistemas para celdas de combustible microbiano, Batch, Feed-Batch y sistema continuo, los estudios demuestran que los sistemas discontinuos son los que más representan desventajas, tales como disminución en el sustrato ocasionado por la alimentación, la proliferación de subproductos, valores bajos de energía (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

Por ello resulta más aplicable los sistemas continuos ya que acarrean ventajas como valores de producción de metabolitos, cinética de crecimiento efectiva para el medio, cumpliendo así un objetivo de la celda de combustible microbiana que es mejorar la capacidad de purificación del agua y resultados a favor de la eliminación de DQO (Franks & Nevin, 2010).

5.5.4 Caudal y tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (HRT) es un parámetro fundamental en el proceso de remoción de contaminantes en aguas residuales siendo este un factor que afecta el caudal y la construcción de las celdas, por ende su operación en tiempo se incrementa y como resultado se obtienen costos más elevados (De Kwaadsteniet et al., 2013). Las investigaciones preliminares describen que el caudal y el tiempo de retención hidráulica son dos parámetros que se encuentran directamente relacionados aumentando la disminución en tasa de DQO, y aumentando la eficiencia coulombica y con el flujo inversamente relacionados (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021). Otra de las ventajas sobre el tiempo es la remoción de compuestos que componen estas aguas residuales tales como: amonio, nitrato, DQO, productos farmacéuticos, nitrógeno total (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

Dado que las MFC son sistemas dinámicos, la HRT optimizada para una MFC puede variar con el tiempo. El tiempo óptimo en algunos estudios se ha obtenido igual a 15,5 horas, 20 horas, 11,3 horas y 24 horas (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

5.5.5 Resistencia Externa

La resistencia interna es un parámetro dependiente de las bacterias involucradas que se ven implicadas directamente en la generación de energía. Cuando los valores de la resistencia externa son estables y los esperados, la potencia al final del proceso y la eficiencia coulombica arrojan resultados favorables para la celda, disminuyendo la producción de metano en la cámara anódica. El voltaje está directamente relacionado con la generación eléctrica, por ello cuando la pérdida de voltaje es la adecuada, la corriente aumenta y así se obtienen densidades de potencia perfectas para la celda (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

La eliminación de la demanda química de oxígeno tiene valores favorables en las celdas cuando la resistencia externa influye en el tiempo de arranque, un claro ejemplo mostró un aumento de la resistencia externa de 10 a 1000 Ω arrojando resultados de tiempo en arranque de la celda de 3 días a 0,6 días (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021), esto quiere decir que la resistencia es un parámetro fundamental en la puesta en marcha de las celdas de combustible microbiano afectando de manera positiva la proliferación de microorganismos, a mayor resistencia mayor producción microbiana, a menor resistencia o resistencias menores a 10 la tasa de crecimiento disminuye significativamente, también afectando la biopelícula que se forma en el electrodo teniendo

grosos bajos y densidades altas. Según el estudio de Sima Malekmohammadui y Seyed Ahmad la resistencia externa baja aumenta la tasa de evolución de la ganancia de energía, su producción, los microorganismo presentes, la potencia al momento de que la celda empieza a operar, aunque los valores de tasa de evolución dependientes del voltaje disminuyen (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

5.5.6 Concentración inicial

Los valores obtenidos de DQO tienen efectos sobre las celdas significativas afectando de manera notable la generación de electricidad, alrededor del 25% que se elimina de la demanda química de oxígeno se aprovecha en la generación de electricidad y el 75% es eliminado en la celda anaeróbica. Un estudio realizado arrojó resultados en la concentración de 100 mg/L a 400 mg/L generando corrientes de 2,2 a 6,8 mA (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021), tener concentraciones bajas de DQO conllevan a la celda a disminuir su producción energética, por ello la producción en la cámara catódica debe ser reducida hasta sus mínimos ya que dependiendo su configuración en la mayoría de los casos la cámara requiere altos valores de COD (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

5.5.7 Nitrógeno

Se podría considerar que la cámara en ausencia de oxígeno por consecuencia realiza un pretratamiento de desnitrificación al sistema. Previo a ello, el nitrito reacciona convirtiéndose en nitrato en la cámara anódica y se oxida liberando electrones, pero esta liberación no genera electricidad, aunque en conjunto con la DQO resultan ser útiles. En la cámara catódica el aumento del pH se da a partir de la presencia de compuestos como Amonio y elementos como Magnesio, calcio, sodio y potasio, teniendo en cuenta que el amonio atraviesa la PEM como resultado se obtendrá amoniaco (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021) ocasionando posiblemente daños. En estudios relacionados a las MFC se ha encontrado que la proporción de DQO a N_2 (DQO/TN) (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021) existe, y cuando esta relación sus valores son bajos, la concentración de efluentes de N_2 baja también sus estándares.

5.6 EFECTO ENTRE LOS PARÁMETROS DE LAS CCM

Si bien es sabido por lo anteriormente mencionado los parámetros se encuentran influenciados el uno con el otro, su efecto puede verse reflejado en la eficiencia del proceso o incluso no alterar de manera significativa. Estudios realizados examinan los efectos de interacción de los parámetros la tabla 2 muestra como efectos simultáneos producen cambios en condiciones específicas del proceso y se ve reflejada en la generación eléctrica o en la descontaminación de las aguas (Franks & Nevin, 2010), en la literatura encontramos dentro de sus recomendaciones sugerencias al efecto simultaneo entre parámetros por esto se pretende demostrar que el diseño de experimentos (DoE) puede ser un camino viable para identificar y disminuir el número de experimentos llevados a cabo para disminuir en costos de producción y fabricación, para ello se recomendaban metodologías a llevar a cabo como factorial completo, Taguchi, factorial fraccionado entre otros (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021), también material estadístico para mejorar los análisis de resultados.

Tabla 2. Efectos simultáneos entre parámetros de CCM

Efectos simultaneos entre parametros	Tipo de Configuración	Aspectos	Referencia
Parametro 1: Tiempo de retención hidráulico (TRH) Parametro 2: Resistencia Externa (RE)	Camara Sencilla Ánodo de cepillo multiple Temp = 30°C Sistema Continuo	*El impacto de la resistencia se omite cuando se tienen valores bajos de TRH *El impacto de TRH es mayor que la resistencia	(Ahn & Logan, 2012)
P1: pH P2: RE P3: Distancia entre electrodos P4: pH	*Sedimento de CCM *Electrodo: Plato de Grafito Temp = 29-30°C Concentración: 170-180 mg/L	* Resistencia y pH tiene un intenso efecto sobre la remoción de la concentración y la densidad de corriente de salida. *A pH menores, mayor eficiencia de eliminación de DQO. *El aumento de la distancia entre electrodos conduce a eficiencia de eliminación, pH bajos. *Entre la distancia del electrodo sea menor aumenta la densidad de potencia.	(Sajana et al., 2014)
P1: pH P2: Concentración P3: HRT P4: Composición del inóculo (Puro y Cocultivado)	*Cámara Dual *Electrodo: Filtro de Carbono PEM: Nafion 117 Temperatura ambiente	La interacción entre los parámetros de DQO inicial, TRH Y Ph es baja. Aunque, el efecto de la composición del inóculo sobre la TRH, el pH y la DQO inicia es significativo. La TRH, por ejemplo, aumenta considerablemente el efecto de la composición del inóculo.	(Islam et al., 2018)
P1:pH P2: Temperatura P3: Concentración	*Cámara sencilla sin mediador *Cátodo = Carbón resistente a la humedad y PEM *Aguas residuales domésticas *Resistencia externa = 150Ω *pH = 6.5 - 7 *Temperatura = 25°C *Modo de Operación: Batch Pentaclorofenol (PCP) *Concentración glucosa 5-1500 mg/L	*El pH y la temperatura no interactúan entre sí, pero el aumento de ambos incrementa drásticamente la densidad de potencia y la eficiencia coulombica. Además, la pendiente del gráfico de pH es más pronunciada, por lo que el parámetro de Ph es más eficiente. *El pH y la conce. no tienen efecto recíproco, pero a más pH hay un efecto en la eficiencia de Coulomb. *El aumento de la concentración afecta fuertemente la producción de densidad de potencia, que esta se ve a menores temperaturas.	(Alshehri, 2015)
P1: pH P2: Resistencia Interna	Sin mediador de doble cámara	Cuando el pH tiene valores bajos, la resistencia interna aumenta.	(Behera & Ghangrekar, 2009)

Fuente: Elaborado por (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021)

Referencias utilizadas: (Ahn & Logan, 2012), (Sajana et al., 2014), (Islam et al., 2018), (Alshehri, 2015), (Behera & Ghangrekar, 2009).

Cada parámetro e interacción se correlacionan trayendo grandes beneficios económicos y de eficiencia en la producción de energía eléctrica y depuración de contaminantes, esto favorecería los costos del proceso a mediano y largo plazo.

5.7 MICROORGANISMOS Y SUSTRATOS UTILIZADOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN CCM

La remoción de contaminantes a través de celdas de combustible microbiano se puede llevar a cabo con microorganismos que se encuentran en el medio ambiente y existe gran variedad de ellos que permiten la transferencia de electrones al ánodo; estudios a lo largo del tiempo han clasificado grupos de microorganismos generadores de electrones entre los más comunes están la Actinobacteria, Firmicutes, Proteobacteria phyla, hongos, algas y levaduras. Algunos de los más utilizados son *Geobacter* spp, *Rhodospirillum rubrum*, *Aeromonas hydrophila*, *Clostridium butyricum*, *Shewanella* spp, *Escherichia E.Coli*, algunos de los microorganismos más reportados en la literatura (Yaqoob et al., 2020).

Al momento en el cual la cámara es alimentada con el agua residual, los microbios ingresan, forman una biopelícula alrededor del electrodo, transfiriendo los electrones por medio de diferentes mecanismos algunos como:

- i. Alcance a través de conductos
- ii. Corto alcance a través de moléculas activas redox
- iii. Transferencia de electrones a través de moléculas transportadoras (Yaqoob et al., 2020)

El electrodo positivo no se considera en la cámara acuosa ya que los microorganismos se localizan en la superficie del ánodo y la energía producida la utilizan en su respiración, esta respiración genera aniones y cationes que son transportados entre los electrodos por medio de una PEM y los electrones son transportados por medio de un circuito interno que los lleva de la cámara catódica a la cámara anódica.

La transferencia de electrones utiliza microorganismos con características grampositivas y gramnegativas, algunas especies de *Desulfuromonas* y *Geobacter* también resultan envueltas con CCMs, su comportamiento en la transferencia de electrones se caracteriza por que a través de moléculas de proteína reducen el medio beneficiando la generación eléctrica. Múltiples proteínas como OmcZ, OmcS, OmcE, OmcT y OmcB están denominadas como bacterias exoelectrógenas dentro de su naturaleza oxidan la materia orgánica, transfieren electrones obtenidos de la oxidación y ceden al electrodo; el mecanismo de transferencia directa de electrones se lleva a cabo con microorganismos como *Pelotomaculum thermopropionicum* y *Synechocystis aerobio*.

La siguiente figura (Figura 4) muestra cómo se lleva a cabo la reducción de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales y como microorganismos exoelectrógenos disminuyen su proliferación. La generación de electrones y la respiración microbiana depende del sustrato que se alimenta a la cámara, los microorganismos son aceptores de electrones, especialmente en los tintes metálicos tóxicos cumpliendo el papel reductor en la reacción (Elements, 2019).

La definición dada a las conversiones biológicas en la superficie del electrodo la cual utiliza electrones para conducirlos e incentivar la precipitación reductora de iones metálicos, creando un ambiente electroquímico que su principal objetivo es llevar las aguas residuales a través de reacciones redox generando así electricidad.

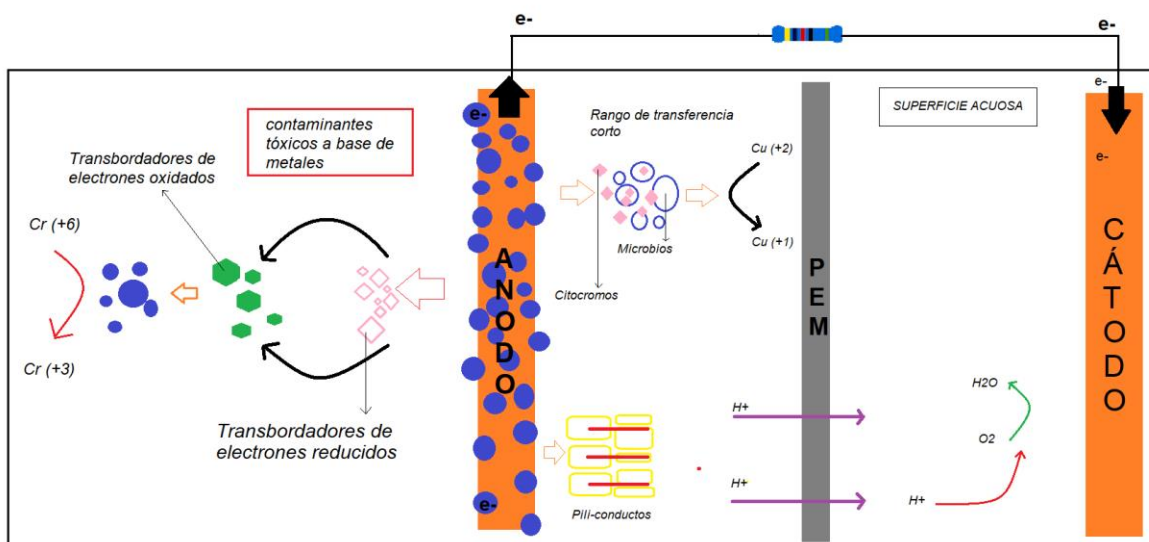


Figura 4. Mecanismos de depuración de metales tóxicos en CCM

Cuando los microorganismos crean la biopelícula en el electrodo de la cámara catódica estos se reducen, precipitándose en la solución, teniendo en cuenta la composición de dicha solución.

La química favorece la reducción de iones metálicos llevándose a cabo espontáneamente sobre el cátodo en su superficie, acarreado un potencial redox a una reacción de semicelda de cátodo.

Así la reducción de metales y la precipitación de metales se da como V(V), Hg (II), Au (III), Cr (VI), Se (IV) y Ag (I).

Uno de los requerimientos energéticos que pide una celda electroquímica para lograr reducciones de iones metálicos en el cátodo si el potencial anódico es menor al anódico es energía externa. Siendo un recurso no apetecido para la termodinámica de su proceso, por ello se llegó a la conclusión que las posibilidades son remotas ya que se dificulta la adsorción a cualquier electrodo con soportes de carbono (Elements, 2019).

Estudios demuestran que la espectroscopia de rayos x de dispersión de energía (EDX), se utiliza para llevar a cabo investigaciones que diferencian las CCM y su proceso de adsorción mediante electrodos, haciendo un escaneo en el tiempo comparando como operan las CCM (Bakhshian et al., 2011). Sin lugar a duda los colorantes orgánicos como azul de metileno, rojo de metileno también son estudiados para su degradación basados en el estado nocivo en el que se encuentran tratando de promover el proceso redox (Ahmed et al., 2022).

Para el caso específico de CO₂, se lleva a cabo un proceso similar a la fotosíntesis llamado electrosíntesis, si bien es sabido la energía la proporcionan los electrodos en su generación consecuente de electrones, creando un ambiente amigable y estable para la reacción redox y la descontaminación consecuente (Ahmed et al., 2022).

5.7.1 Microorganismos en la cámara anódica

A menudo se emplean cultivos mixtos o cultivos de especie microbiana, para la especie *G. Sulfurreducens* y su transferencia de electrones a ánodo, junto al lactato ella posee características dominantes, con acetato, formato, glucosa, entre otros. Y siendo la excepción de la familia *Shewanella* genéticamente su transferencia de electrones es altamente utilizada. Se utilizan en la cámara anódica arqueas y levadura como *Saccharomyces cerevisiae* (Revelo et al., 2013).

Los cultivos mixtos poseen una ventaja económica y viable para trabajar con ellos ya que su potencial energético es elevado, los consorcios anódicos y bacterias más utilizadas a escala

laboratorio son *Shewanella*, *Geobacter*, *Proteobacter*, *Pseudomonas*, *S. Putrefaciens*, *P. Aeuruginosa*, *G. Sulfurreducens* y *G. Metallireducens*, microorganismos que poseen características bacterianas de transferencia directa en su mayoría y en otros diversos casos y dependiendo de su medio, mediadores (Revelo et al., 2013).

5.7.2 Microorganismos en la cámara catódica

Los microorganismos que se encuentran ampliamente relacionados como receptores de electrones en la cámara catódica encontramos a *G. Sulfurreducens* y *S. Putrefaciens*, en su mayoría su caracterización dentro del mundo microbiológico son bacterias en biocatódos-Gram Negativas y en otros casos caracterizaciones Gram-positivas tales como *Micrococcus Lateus*, *Bacillus Subtilis*, y *Staphylococcus carnosus* (Revelo et al., 2013).

Para la cámara catódica se han empleado microorganismos como bacterias, incluso microalgas, recientemente se divulgo una investigación de un inóculo de una cepa de hongo, *Coriolus versicolor*, su objetivo principal es mejorar la eficiencia de reducción del cátodo para obtener generación eléctrica, sus resultados arrojaron un rendimiento mayor en comparación con el rendimiento del cátodo abiótico convencional, teniendo en cuenta que las densidades de potencia son mayores también (Wu et al., 2012).

5.7.3 Sustratos

Se podría definir al sustrato como el combustible para la generación de energía eléctrica, la literatura ha reportado diversos sustratos para CCM desde compuestos puros, hasta compuestos complejos. Algunas de las características más prominentes en los compuestos puros es su alta degradabilidad por ende la producción energética y producción de hidrógeno, es mayor. Los parámetros fisicoquímicos medibles como la eficiencia coulombica, densidad, potencia, resistencia interna, son facilitadores dada su naturaleza. Algunos sustratos empleados son: acetato, glucosa, sacarosa, tintes sintéticos, indol, lactosa, maltosa, xilosa, formiato, en otros (Revelo et al., 2013).

Para tener en cuenta al momento de elegir un sustrato para la CCM, su costo, los costos varían según el tipo de sustrato, los sustratos puros resultan tener costos elevados, los sustratos complejos como el resultado de desechos industriales, domésticos, agrícolas son de adquisición sencilla y

bajo costos económicos en algunos casos(Sharma & Li, 2010). La concentración en sustratos es un tema que debe ahondarse, los efectos que acarrea esta pueden ser: aumentar la velocidad de la reacción conduciendo la celda a una producción energética abundante o causar el efecto contrario a bajas concentraciones, ocasionando densidades bajas por ello. Cabe resaltar que algunos sustratos tienen como objetivo específico en algunos casos incentivar la proliferación bacteriana (Sharma & Li, 2010).

5.8 COMPARACIÓN EN SISTEMAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO

Estas comparaciones se llevan a cabo teniendo como base su modo de construcción, los materiales en los cuales se han trabajado los electrodos (ánodo y cátodo), las membranas de intercambio protónico y las soluciones químicas.

Las celdas de combustible microbiano en los últimos años se han caracterizado por sus avances, un diseño reciente es una CCM mini que se ha desarrollado con las siguientes especificaciones, cámara de 4cm, cámara de analito de 3 cm de diámetro, un ánodo en cepillo de fibra de grafito y un catalizador de cátodo de platino (Franks & Nevin, 2010), como fuente de combustible utiliza fosfato y acetato, estos diseños similares y en su mayoría idénticos permite a los lectores e investigadores realizar comparaciones de generación eléctrica y depuración de aguas.

La densidad de corriente es el parámetro que indica el nivel del rendimiento de la celda ya que si este parámetro se encuentra desfasado la generación en la CCM se vería notablemente disminuida (Franks & Nevin, 2010). Los indicadores de rendimiento tradicionales, como la densidad de corriente/potencia, la resistencia, la impedancia y las pruebas de capacitancia, son indicadores fundamentales en las celdas.

Uno de los factores que obstaculiza el avance en la tecnología de celdas de combustible microbiano es la estandarización en las condiciones de producción energéticas.

Se miden diversos parámetros, tales como la densidad de corriente que es el indicador más utilizado. El área superficial de los electrodos puede variar, tampoco se tiene un punto de comparación para poder medir la producción energética, dado esto la solución que se encuentra es el área superficial proyectada.

Por último, un estudio reciente propuso un parámetro que se podría estandarizar y es la recuperación de energía normalizada (NER), dado esto se podría medir en kW/h m^{-3} (Franks & Nevin, 2010).

5.9 DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN CCM

La reducción de metales en las celdas de combustible microbiano es una operación en conjunto con sus componentes esenciales, electrodos, microbios y las condiciones de operación; por ello se abordaron temas basados en investigaciones cómo es posible la remoción o disminución a valores permisibles y obteniendo eficiencias en las CCM en termino de tratamientos de aguas y generación eléctrica.

5.9.1 Degradación de metales tóxicos en CCM

Los principales productores de la contaminación ambiental basada en metales tóxicos son las grandes industrias de textiles, hidrocarburos, cerámicas, médicas y domésticas. Los tratamientos convencionales de aguas residuales no son aptos para la remoción de estos metales ya que su bioacumulación se incrementa cada vez más, por ello las celdas de combustible microbiano son una tecnología emergente que en su composición posee microorganismos que permiten la reducción de metales tóxicos que se solubilizan en el agua tales como U (VI), Cr (VI), Cu (II), Cd (II). Algunas bacterias electroactivas no cumplen con las características biológicas de reducción de metales tóxicos, por ello se opta por las reacciones redox para depurar estos metales.

El ion Cu^{2+} , presente en desechos de aguas de uso urbano, aguas industriales siendo este elemento apto para remoción por medio de CCM. El Cr, elemento existente en aguas debido a su solubilidad en medio acuoso se bioacumula y su eliminación es compleja, por ello se utilizó Actinobacteria y B-Proteobacteria para su remoción, siendo un microorganismo viable para la depuración ya que con una concentración inicial de 5mg/L después de 144h disminuyo la concentración (Yaqoob et al., 2020). Para la eliminación del cromo se utilizan algas y su remoción es del 98% mediante el uso de carbón activado como electrodos de biomasa (Elements, 2019).

Cuando la celda presenta pH bajos la remoción de metales como el Au, se debe buscar alternativas y una de ellas es utilizar electrodos de grafito-Pt y un microorganismo de tipo Shewanella. Las

concentraciones a la entrada son de 200 ppm y la eficiencia de su depuración son del 6% (Elements, 2019).

Los sistemas bioelectroquímicos BES se utilizan para representar celdas de combustible microbiano MFC, como las celdas de electrólisis microbiana, este término es usado ya no solo se utilizan para la depuración de aguas residuales y generación eléctrica, adicional a eso se planteó recuperas metales preciosos es así como:

Para la remoción de Cu en aguas residuales, (Attia et al., 2022) en su investigación reportó una opción de material de fieltro de grafito como ánodo y cátodo, operando las condiciones de temperatura, tiempo de reacción y las concentraciones con las cuales se alimenta la materia prima. Obteniendo como resultado la remoción del 99%, teniendo en cuenta los valores de pH cercanos a ácidos fuertes. Se obtuvieron datos de densidad de potencia al finalizar el proceso y con concentraciones relativamente bajas (Ezziat et al., 2019).

Otro de los elementos de más altas concentraciones en aguas residuales es el Cr, por ellos existen investigaciones científicas reportados sobre la depuración del Cr, el objetivo es convertir Cr (VI) en Cr (III), esto quiere decir que pasa de un estado altamente tóxico.

El óxido de grafeno reducido es un óxido de grafeno, mejorado, esta investigación se basa en emplear óxido de grafeno reducido como acelerador de la reacción que ocurre en el cátodo sin membrana de intercambio, todo esto para obtener metales como cobre y producir energía durante el proceso (Ezziat et al., 2019).

Se conocieron datos de la eficiencia comparada entre el óxido de grafeno convencional y el reducido informando que la energía generada fue del 67% sobre el nivel del grafeno convencional (Ezziat et al., 2019).

Los factores influyentes sobre el proceso de depuración de aguas y eliminación de metales dado diferentes investigaciones publicadas (Elements, 2019) son: pH, concentración inicial, temperatura y el tipo de electrodo que fuese usado.

En medio de lo que se ha publicado acerca de celdas de combustible microbiano se cree fielmente que esta tecnología emergente establece que la tasa de eliminación es de hasta el 100% y en DQO es del 99%, esto lleva a la conclusión que es un método de tratamiento de agua sostenible (Elements, 2019).

La tabla 3 a continuación, muestra los diferentes tipos de contaminantes, la configuración para la celda, el inóculo en el cual se encuentran, los microorganismos utilizados:

Tabla 3. Degradación de metales tóxicos con salidas de energía de las CCM

Contaminantes metálicos	Configuración CCM	Tipos de Electrodo		Inoculo/ Microbios	Tiempo de Operación <h>	Temperatura °C	Ph	Concentración Feed <mg/L>	Eficiencia de remoción <%>	Densidad de Potencia <mW/m2>
		Ánodo	Cátodo							
Cr (VI)	DMFC	Platos de Grafito	Platos de Grafito	Aguas residuales domesticas	150	25	2	100	100	150
Cr (VI)	DMFC	Placa de grafito sin pulir	Grafito natural con recubrimiento de rutilo	Lodo anaeróbico	26	22	2	26	97	-
Se	SMFC	Tela de carbono no resistente a la humedad	Tela de carbono resistente a la humedad	Cultivo mixto (acetato y glucosa como fuente)	<48	30	-	75 mg Se/L 200 mg Se/L	99	-
V(V)	DMFC	Filtro de fibra de Carbono	Filtro de fibra de Carbono	Lodo anaerobico granular	72	35	1	25 mL	87.9	578.3
Cr (VI)	DMFC	Plato de grafito	Grafito granular	Bacterias autoctonas para Cr(VI)-	173	22-26	2	39.2	2.4 ± 0.2 mg g VSS-1/ h	6.9
Cu(II)	DMFC	Filtro de Grafito	Filtro de Grafito	Lodo Anaerobico	144	35	-	500	70	314
Cu(II)	DMFC	Filtro de Grafito	Filtro de Grafito	Lodo anaeróico con Cu	144	35	-	500	70	314
Cu(II)	DMFC	Plato de Grafito	Filtro de Grafito	Lodo Anaeróbico	20	35	3.5	200	>99	314
Cu(II)	DMFC	Plato de Grafito	Plato de Grafito	Lodo Anaeróbico	20	35	4.7	112 ± 26.7 mg Cu _h	>99	339
Hg(II)	DMFC	Filtro de Grafito	Papel de Carbon	Lodo Anaeróbico	10	30	2	100	98.22 - 99.54	433.1
Cr(VI)	DMFC	Filtro de Grafito	Filtro de Grafito	Lodo Anaeróbico	144 y 192	35	-	5 con 93 25 con 61	5 mg/L con 93, 25 mg/L con 61	-
Cu(II), Pb(II)	DMFC	Filtro de Carbono	Filtro de Carbono	Muestra sintética diluida	14-36 días	25	3	1.1 Cu (2+)	Pb 92 Cu 99	17.1

Elaborada por: (Yaqoob et al., 2020)

5.9.2 Degradación de contaminantes utilizando colorantes orgánicos en CCM

Las aguas residuales que consigo llevan colorantes de diferentes fuentes producidas en industrias agrícolas, farmacéuticas es una contaminación latente y evidente, estos contaminantes son altamente nocivos para la salud animal y humana ya que son extremadamente visibles, existe un colorante llamado colorante azoico y tiene características carcinógenas, en su composición química estos compuestos contienen aminos aromáticas que suelen ser de tipo mortal para el reino animal. La tabla 4 muestra los diferentes tipos de tintes y su consecuente método de eliminación (Ezziat et al., 2019).

Tabla 4. Lista de eficiencia de eliminación de colorantes, producción de energía a través de CCM

Contaminantes a base de colorantes	Configuración CCM	Tipos de Electrodos		Inoculo/ Microbios	Tiempo de Operación	Temperatura °C	Ph	Concentración Feed <mg/L>	Eficiencia de remoción <%>	Densidad de Potencia
		Ánodo	Cátodo							
Naranja ácida 7	DMFC	Varilla de Grafito	Varilla de Grafito	Consortio microbiano	336	25	7	0.06	78	0.31 ± 0.03
Cr (VI)	DMFC	Filtro de Carbono	Filtro de Carbono	*	18	30	[3,9]	*	*	34.77
Naranja de metilo Naranja I Naranja II	DMFC	Grafito sin pulir	Cátodo de grafito recubierto de rutilo	Lodo Anaeróbico	24	25 ± 1	*	[10,20]	73.4	0.13 ± 0.03
Naranja de metilo	DMFC	Carbón activado	Tela de carbón hidrofóbico	Proteus hauseri ZMd44	480	30	*	[450,560]	75	103
Tintes textiles	SMFC	Grafito granular	Grafito puro espectrográfico	*	12	*	3	75	82.59	137.37
Amaranto	DMFC	Papel de carbono poroso	Papel de carbono poroso	Lodo Anaeróbico	12	*	7	300	90	213.93
Rojo brillante activo X-3B	DMFC	Papeles de carbón (porosos no resistentes a la humedad)	Papel de carbón con Pt (poroso húmedo)	Mezcla de lodos aeróbicos	*	30 ± 1	*	300	90	324
Rojo Congo	SMFC	Tela de carbón	Tela de carbón	Shewanella aneidenensis	30	25	7	350	>98	*
Naranja acida 7	DMFC	Carbón	Carbón	lodo marino	96	25	[4,6.1]	500	93.15	15.73
Metileno Azul	WMFC	Papeles de carbón simples (no resistentes a la humedad)	Papel carbón (resistente a la humedad)	Cultivo aerobio de lodos	26	30 ± 1	*	*	85	107
Colorante rojo brillante activo	DMFC	Carbón activado-granular	Malla de acero inoxidable	Lodo anaeróbico	72	25 ± 2	*	*	85.65	610
Tintes	DMFC	Carbón activado-granular	Malla de acero inoxidable	Lodo Anaerobio (Geobacter Sulfurreducens and)	72	25 ± 2	*	150	91	610
Colorante Azoico	DMFC	Granulos de grafito	Granulos de grafito	Lodo Anaeróbico	48	*	[3,7]	*	85	34.77

Fuente: Elaborada por (Yaqoob et al., 2020)

Una de las soluciones para esta contaminación es el uso de celdas de combustible microbiana con características como membranas de intercambio protónico, ultrafiltración y microfiltración.

Se comparan entre ellas los parámetros de descontaminación según el tipo de membrana utilizado en los estudios, la membrana de ultrafiltración genera densidades de 324 mW/m^2 y adicional su eficiencia coulombica supera a la membrana de ultrafiltración. Aunque sus tasas de decoloración la membrana de ultrafiltración obtuvo mejores datos $3,61 \text{ mg/L}$ por $1,72 \text{ mg/L}$ para la membrana de intercambio protónico (Elements, 2019).

El año 2011 fue publicada un estudio el cual hablaba de un biocátodo aeróbico que su objetivo era la remoción de compuestos colorados tipo azo (Elements, 2019), dando como resultados la eficiencia de este biocátodo para la depuración de colorantes tipo azo y adicionalmente un rentabilidad por su producción energética. Para las fuentes inóculo se utilizaron lodos aeróbicos y se trataron con papel de carbón poroso con el fin de utilizarlo como electrodo en una CCM de doble cámara mostrando eficiencias energéticas del 90% y una remoción de contaminantes de $213,93 \text{ mW/m}^2$, llamando a esta nueva CCM de humedales (Elements, 2019), teniendo el mismo diseño que la MFC convencional, dos cámaras una catódica y una anódica y una membrana de intercambio protónico. Sus resultados experimentales arrojan valores de remoción de DQO del 75% (Elements, 2019).

Cuando los microorganismos son cultivados en el electrodo catódico aumentan su potencial catódico y la remoción del tinte mejora en respuesta. Los humedales de tipo CCM alcanzan tasas de decoloración del 91,24% (Elements, 2019).

Las industrias textiles contaminan a niveles exorbitantes, por ello una investigación basada en la bacteria *Proteus hauseri* es utilizada en CCM sobre la superficie de una tela de carbón poroso como electrodo, para lograr una remoción del tinte a base de tironina (Elements, 2019).

Como conclusión se halló que los sistemas cerrados resultan ser más eficientes con respecto a depuración de colorantes y la oxidación de biomasa comparándolo con sistemas abiertos. Un estudio adicional que mostró grandes resultados fue una combinación de las dos cámaras, interconectadas sin membrana de intercambio, produciendo una tasa de descoloración del naranja ácido 7 en un rango del 89-96% (Elements, 2019).

6. COMPARACIONES ENTRE CCM

Las celdas de combustibles microbianos tienen variedades las cuales entre ellas tienen capacidades distintas, nombraremos a continuación algunas de ellas:

Por sus siglas en inglés (SMFC), celdas de combustibles microbianas sumergibles que están compuestas una cámara anódica y una cámara anódica que se encuentran sumergidas en un reactor anaeróbico, los estudios han arrojado que las celdas con configuraciones sumergibles son factibles y eficientes dada su configuración para el tratamiento de aguas residuales y obteniendo resultados favorables para la eliminación de la demanda química de oxígeno.

Otra configuración es la celda de combustible microbiana sumergible autoapilada por sus siglas en inglés (SSMFC), consiste en dos unidades de celda con una sola cámara de aire conectadas entre sí en serie, a este tipo de celdas se les proporciona inóculos especiales para potenciar su rendimiento. (Tamboli & Eswari, 2018)

Otra de las celdas que también hacen parte de este tema, son las celdas de combustible microbiano flotante, por sus siglas en inglés (FMFC) que son muy singulares y adicionalmente parecidas a las celdas de sedimentos, estas se caracterizan por que sirven como alimentos a dispositivos diminutos. Las FMFC alcanzan incluso niveles oceánicos, esto conlleva a que su configuración arrase con una ventaja sobre las celdas de sedimentos y es que estas particularmente tienen limitaciones en su profundidad. Los sistemas híbridos son llamados así por su configuración, nombraremos la celda de combustible microbiana de humedales artificiales (CWeMFC), combina tecnologías como humedales artificiales un punto en el medio ambiente esencial de mantener y recuperar y la tecnología emergente que se abarcó en esta revisión, estas dos configuraciones muestran una compatibilidad alta debido a sus condiciones de operación, cámara anódica en ausencia de oxígeno y cámara catódica con oxígeno, que se encuentran en humedales construidos.(Tamboli & Eswari, 2018)

Por último, abordaremos el tema de las celdas de combustible microbiano vegetal que en su configuración guardan similitudes con las CWeMFC ya que su metabolismo se basa de microbios en la rizosfera. Las PMFC por sus siglas en inglés, generan electricidad por medio de las interacciones que ocurren entre los microbios y las plantas al momento en el que realizan la fotosíntesis, su aplicabilidad puede generar energía de forma continua, haciendolas llamativas al

mundo científico ya que se ajustan a tierras agrícolas sin afectar los cultivos o incluso su producción (Kabutey et al., 2019).

7. TECNOLOGÍAS PRESENTES Y FUTURO DESARROLLO EN CCM

El primer competidor de las celdas de combustible microbiano es la Digestión anaeróbica metanogénica, es un proceso de origen biológico que se desarrolla por microorganismos en ausencia de oxígeno degradando la materia orgánica en proteínas y descomponiendo los carbohidratos y lípidos en sus formas más sencillas, como resultado los pesos de las azúcares, aminoácidos y ácidos grasos volátiles obtienen una mejor característica de solubilidad en agua (Residuos et al., 2022); esta tecnología se caracteriza por su aplicabilidad al área comercial ya que su materia prima puede reutilizarse para la generación eléctrica (Elements, 2019).

Uno de los principales gases contaminantes es el dióxido de carbono, una de las tecnologías prometedoras para su captura son las celdas de combustible microbiano, por medio de la conversión biológica en materia orgánica por medio de microorganismos que realizan su conversión energética por medio de fotosíntesis, algunas de estas son microalgas y cianobacterias. Tienen la capacidad de capturar el CO₂ produciendo fuentes de carbono y utilizar el electrodo catódico como donante de electrones. La ciencia apunta hacia CCM autosostenibles con captura simultánea de CO₂ directamente desde la atmósfera (Engenharia, 2012).

Uno de los elementos más usados es el O₂ por su característica de aceptor de electrones en la cámara, su potencial de oxidación y su accesibilidad. Las CCM actualmente utilizan Pt con el objetivo específico de aumentar la tasa de reducción, según estudios y perspectivas futuras debería abordarse una implementación de aire-cátodos en filtro de prensa (Engenharia, 2012).

7.1 ESTADO DEL ARTE

Como antecedente investigativo se estudiaron 20 artículos científicos y revisiones bibliográficas que a continuación abordaran su objetivo de investigación, aportes y hallazgos:

Uno de los artículos investigados es titulado “**Desarrollo de una celda de Combustible Microbiana (CCM) para la aplicación en Tratamiento de aguas residuales**”. Es escrito por

Juan David López Hincapié para obtener el título como Maestro en Ciencia y Tecnología en la especialidad de Ingeniería Ambiental, realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQU), bajo la dirección del Dr. Adrian Rodriguez Garcia. Como aspectos principales, esta tesis tiene como fin el desarrollo de una CCM que su viabilidad económica y de fácil construcción, siguiendo su utilidad para el tratamiento de las aguas residuales paralelo a la generación eléctrica, teniendo como materia prima agua residual sintética con alta carga orgánica (Un et al., 2014).

El siguiente fue un trabajo llamado **“Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo Batch”**, que como aspectos principales presentó como requisito previo a la obtención del título de Química por Dayanna Carolina Chicaiza Ñacato y su tutor MSc. Raúl Alfonso Bahamonde Soria.

Esta tesis plantea un modelo de celda acoplado a un campo magnético (CM) estático, para mejorar su rendimiento, mostrando el rendimiento de la celda en la producción de energía tipo H en Batch mediante la degradación de aguas sintéticas (AS) y residuales domésticas (AR) (Ñacato Chicaiza Dayanna Carolina; MSc. Raúl Alfonso Bahamonde Soria, 2018), posteriormente se añadió el trabajo de investigación titulado **“Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio”**, sus aspectos relevantes fueron la investigación para optar el título de Ingeniero Químico presentado por Sergio Andres Medina Mesa, Maria Julieta Zapata Rojas y su codirectora Adriana Páez (Microbióloga). El proyecto de investigación trata acerca de la producción de energía eléctrica y la disminución de la Demanda Química de Oxígeno en aguas residuales sintéticas usando dos bacterias Escherichia Coli y Pseudomonas aeruginosa, bajo condiciones preestablecidas de operación para la celda, empleando grafito y tela de carbono como electrodos (Mesa, 2017) .

El trabajo de investigación titulado **“Evaluación del efecto de polímeros conductores en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas”**, presentado como requisito previo a la obtención del título de Químico por Nathaly Sofia Bassante Acuña y como tutor el Dr. Raul Alfonso Bahamonde Soria. Este trabajo de grado aborda la construcción de celdas de combustibles microbianas (CCM) a base de polímeros conductores

(polipirrol y polianilina) que son situados en los electrodos a base de grafito que han sido reciclados de pilas y escobillas de carbono. Evaluando el efecto de los ánodos en la degradación de la materia orgánica y la generación de electricidad en las celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales (Nathaly sofia & Soria, 2018).

Se añadió a la lista de la revisión el artículo titulado **“Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustibles microbianas”**, elaborada por Mireya Sanchez, Lenys Fernandez, Patricio Espinoza Montero. El trabajo que se realizó aborda el funcionamiento y características principales de las celdas de combustible microbianas, como: clasificación, componentes, mecanismos de funcionamiento, actividad microbiana y material de electrodos (Espinoza-montero, 2021).

Seguidamente el artículo de Investigación titulado **“Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos”**, elaborado por Germán Buitrón y Jaime Pérez abordando el efecto en la distancia entre los electrodos y el rendimiento de la electricidad y la depuración de la materia orgánica en celdas de combustible microbianas teniendo como materia prima aguas residuales. Se construyeron tres celdas con volúmenes desiguales pero con su estructura semejante para evaluar el efecto que se produce en el aumento de la distancia entre los electrodos midiendo los voltajes producidos (En et al., 2011). El artículo siguiente fue una investigación titulada **“A review of the operating parameters on the microbial fuel cell wastewater treatment and electricity generation”**, elaborado por Sima Malekmohammadi y Seyed Ahmad Mirbagheri que exponen como enfoque principal un uso más eficiente y completo de la biomasa para la producción de bioenergía. Se estudia el rendimiento general de un MFC, sus parámetros operativos, los sustratos a utilizarse y los microorganismos; estudian el efecto a la par que producen parámetros como temperatura, pH, caudal, tiempo de retención hidráulica, modo, resistencia externa y concentración inicial comparándose entre sus efectos como intensificadores o atenuadores (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021). Una investigación llamada **“Electricity generation and microbial community response to substrate changes in microbial fuel cell”**, escrito por Yifeng Zhang, Booki Min, Liping Huang, Irini Angelidaki, investigaron el efecto producido por alteraciones en el tipo de sustrato en el rendimiento y la comunidad microbiana de las celdas de combustibles microbianas de doble cámara. Esta investigación da como resultado que el tipo de sustrato es un aspecto importante ya que afecta el rendimiento del reactor y la comunidad microbiana siendo un

parámetro notable al momento del rendimiento en la generación de energía en MFC (Zhang et al., 2011). Se investigó también el artículo de investigación titulado **“Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell”**, escrito por Bruce E. Logan, Cossandro Murano, Keith Scott, Neil D. Gray, Iran M. Head, esta investigación aborda la generación de energía produciendo la oxidación de biomasa por bacterias en el ánodo, con reducción de oxígeno en el cátodo. Las membranas que son utilizadas en esta investigación se caracterizan por su intercambio protónico y su permeabilidad al oxígeno, dando como resultado la difusión del oxígeno en la cámara del ánodo (Logan et al., 2005).

Adicional, **“Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells”** que como aspecto es un artículo escrito por Tunc Catal, Kaichang Li, Hakan Bermek, Hong Liu, esta investigación se basa en la generación directa de electricidad a partir de monosacáridos de biomasa lignocelulósica en celdas de combustible microbiana de cátodo de aire; se variaron las fuentes de carbono y se utilizaron hexosas, tres pentosas, dos ácidos urónicos y un ácido aldónico para comparar tiempos de adaptación y la máxima potencia obtenida estas fueron las hexosas utilizadas: d-glucosa, d-galactosa, d-levulosa, l-fucosa, l-ramnosa y d-manosa. Tres pentosas: d-xilosa, d-arabinosa y d-ribosa, los ácidos urónicos: ácido d-galacturónico y ácido d-glucurónico y por último el ácido aldónico: ácido d-glucónico. Los investigadores llegaron a la conclusión que al utilizar monosacáridos como materia prima para generar electricidad es viable utilizando tecnología MFC (Catal et al., 2008).

La investigación hecha por Deng Huan, Wu Yi-Cheng, Zhang Fan, Huang Zong-Chuan, Chen Zheng, Xu Hui-Juan y Zhao Feng, llamada: **“Factors Affecting the Performance of Single-Chamber Soil Microbial Fuel Cells for Power Generation”**, incursiona en la investigación de los factores que afectan la generación de energía eléctrica en celdas de combustibles microbiano específicamente en las de cámara sencilla que como materia prima son alimentadas directamente del suelo con su ánodo incrustado y del agua con el cátodo superpuesto. El estudio varia las profundidades y la temperatura para medir el desempeño de la celda, correlacionando la temperatura y la producción de energía eléctrica (Huan et al., 2014).

Algunas investigaciones se centran en biocátodos, este artículo escrito por Koen Wetser, Emilius Sudirjo, Cees J.N. Buisman, David P.B.T.B. Strik, llamado: **“Electricity by a plant microbial**

fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode”, tiene como objetivo principal aumentar el rendimiento de una celda de combustible microbiana de planta (PMFC) reemplazando un cátodo químico por un cátodo biológico, en este caso el cátodo químico de ferricianuro por un cátodo reductor de oxígeno. Se llegó a la conclusión que este reemplazo provocó cifras inalcanzadas ya que los altos niveles de potencial se deben al efecto oxido-reducción que ocurre efectivamente en el cátodo originario de los microorganismos (Wetser et al., 2015).

Shaoan Cheng y Bruce E. Logan abordan un tema en particular como lo es la importancia de los diferentes factores como el área superficial del electrodo en un artículo de investigación titulado: **“Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells”**, poniendo como eje principal la geometría del reactor relacionándolo con las condiciones fisicoquímicas de la solución y como esta afecta la conductividad y la concentración del sustrato. Generando resultados positivos enfocados en la geometría de la celda llegando a la conclusión de que la densidad de potencia volumétrica es una función lineal del área de superficie específica del cátodo, pero la resistencia del sustrato depende del tamaño del cátodo y su conductividad (Cheng & Logan, 2011).

Esta revisión abarca tecnologías para el desarrollo de las celdas de combustible microbiano, dando un enfoque preciso en microbiología y electroquímica, titulado: **“Microbial fuel cells: An overview of current technology”**, escrito por Anthony J. Slate, Kathryn A. Whitehead, Dale A.C, Browson, Craig E. Banks, para lograr escalar estas nuevas tecnologías a tamaño industrial. Se analiza el rendimiento como factor clave en la producción energética, tomándolo como un limitante a mejorar (Slate et al., 2019).

Esta revisión resume un enfoque basado en la biorremediación de tintes orgánicos y metales tóxicos, se hace la revisión a 170 artículos con el fin de profundizar y encontrar la viabilidad de la investigación (Yaqoob et al., 2020), titulada: **“Outlook on the role of Microbial fuel cells in Remediation of Environmental Pollutants with Electricity Generation”**, escrita por Asin Ali Yaqoob, Asma Khatoon, Siti Hamidah Mohd Setapar, Khalid Umar, Tabasuum Parveen, Mohamad Nasir Mohamad Ibrahim, Aki Ahmad y Mohd Rafatullah,

Esta revisión abarca las consideraciones ambientales y económicas en la producción de bioenergía a partir de biomasa; titulada: **“A review of the operating parameters on the microbial fuel cell for wastewater treatment and electricity generation”**, escrita por Sima Malekmohammadi y Seyed Ahmad Mirbagheri la pila de combustible microbiana que utiliza actividad catabólica directamente de microorganismos a partir de biomasa es una de las tecnologías contemporáneas que incursionan en el campo de competición contra las energías a partir de residuos fósiles. Se estudian como llegar a hacer estas pilas competentes en el mundo industrial optimizando los parámetros y aplicandolos para el desarrollo comercial de estas. Los parámetros que aborda esta investigación son: pH, temperatura, caudal, tiempo de retención hidráulica, modo, resistencia externa y concentración de la biomasa (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021).

Esta revisión bibliográfica ha tenido un enfoque en dos partes, titulada: **“Overview of recent Advancements in the microbial fuel cell from fundamentals to applications: Design, Major Elements and Scalability”**, escrita por Sami G. Flimban, Iqbal M. I. Ismail, Taeyoung Kim y Sang-Eun Oh. El primero de ellos son sus precedentes y las investigaciones que se han desarrollado de celdas de combustibles microbianas desde que esta ha sido investigada e implementada y como segundo aspecto el rendimiento y su factibilidad. Se presentan el diseño y la manera en que este es evaluado al punto de minimizar pérdidas de energía y maximizar su rendimiento generando así recursos bibliográficos para escalar la tecnología MFC a escala industrial (Elements, 2019).

“Nanocoating of microbial fuel cell electrodes for enhancing bioelectricity generation from wastewater”, artículo que como conclusión llega a que la conductividad siguiendo el método estudiado es 4.9 veces más efectiva que el método convencional (Attia et al., 2022), escrito por Yasser A. Attia, Mohammed Samer, Mahmoud S.M. Mohammed, Elshaima Moustafa, Mohamed Salah, Essam M. Abdelsalam; este artículo se enfoca en estudiar un método para la producción de energía eléctrica a partir de celdas de combustible microbiano por medio de recubrimientos con nanomateriales que se dirigen a incursionar en la creación de prototipos de electrodos con alta tecnología o nano revestidos. Los resultados obtenidos de potencia fueron estables y altos.

Este artículo abordó como objetivo principal la generación de electricidad utilizando como materia prima aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiana de doble cámara sin mediador, titulado **“Optimization of double chamber microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and electricity production”**, escrito por Amr El-Hag Ali, Ola M. Gomma, Reham Fathey, Hussein Abd El Kareem, Mohamed Abou Zaid. Se monitorearon parámetros como demanda biológica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) (Ali et al., 2015).

Se trabajó con ferrita de cobalto fabricándose ésta como hidro-térmicamente y se recubre el ánodo sobre una lámina de grafito para hacerlo viable económicamente (Munjal et al., 2020). Esta revisión científica está escrita por Mehak Munjal, Bhumika Tiwari, Shubra Lalwani, Meenakshi Sharma, Gurmeet Singh, Raj Kishore Sharma, titulada: **“An insight of bioelectricity production in mediator less microbial fuel cell using mesoporous Cobalt Ferrite anode”**

Las celdas de combustible microbianas son una tecnología emergente sostenible e innovadora que su protagonista son las bacterias que se encuentran presentes en aguas residuales y trabajan como biocatalizador produciendo energía eléctrica.

Se realizó una tabla de Excel con datos sobresalientes de los artículos que se utilizaron como base de investigación y soporte para desarrollar la revisión bibliográfica, el título en el idioma en el que se encuentra dentro de la revista publicada, el país donde se realizó el estudio, el objetivo general de cada proyecto y las características que sobresalen de este:

Tabla 1. Tabla dinámica de Excel de la base de datos de los artículos científicos estudiados, elaboración propia

Título	Institución/País	Obj. General	Características metodológicas	Resultados/Aportes	Uso o vínculo con mi investigación	Referencia
Desarrollo de una celda de Combustible Microbiana (CCM)	Santiago de Querétaro, Mexico	Desarrollar una celda de Combustible microbiana para la	pH, Oxígeno Disuelto OD, Potencial de	La primera CCM	El desarrollo de una CCM	(Un et al., 2014)
Evaluación de la	Ecuador	Evaluar la aplicación de un campo	Materiales especificados	Las CCMs acopladas al	Este trabajo	(Ñacato
EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y	Colombia	Evaluar la producción de energía eléctrica y disminución de DQO	Disponibilidad y selección de cepas,	Se pudo observar que la cepa con	Este proyecto de investigación	(Mesa, 2017)
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE POLÍMEROS	Ecuador	Evaluar el efecto de polímeros conductores en el	Variables Independientes: Tipo de	//La evaluación de los diferentes	Degradación de	(Nathaly sofia &
Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante	Ecuador	Realizar una revisión de los aspectos mas importantes que rigen el funcionamiento de	Se basa en una investigación cuantitativa	Las MFCs es una tecnología ecológica que	Investigación de la producción de energía	(Espinoza-montero, 2021)
Producción de Electricidad en celdas de Combustible	Mexico	Se evalúa una estrategia de arranque para favorecer la	Evaluación del funcionamiento	La mayor potencia-h (77.3W-h) se	Se evaluó la producción de	(En et al., 2011)
A review of the operating parameters on the microbial fuel	Iran	Se estudia el rendimiento general de un MFC	Los sistemas MFC se examinan en	El rendimiento de MFC está	Estudio de los parámetros	(Malekmohammadi &
Electricity generation and microbial community response	Republica de Korea	Las MFC enriquecidas con un solo sustrato	Se construyeron MFC de dos	Esclarecer la respuesta de la generación	Estudiar el tipo de sustrato	(Zhang et al., 2011)
Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell	USA	Utilizar cistina como sustrato para la generación de	Se construyeron MFC de dos	Esclarecer la respuesta de la generación	En una celda de combustible	(Logan et al., 2005)
Electricity production from twelve monosaccharides	USA	La generación directa de electricidad a partir de	En este estudio, primero	Se generó electricidad con éxito a	La generación directa de electricidad a	(Catal et al., 2008)
Electricity generation by a plant microbial	Países Bajos	Demostrar que un cátodo químico de	Se construyó una placa	Se integró con éxito un	Producción de energía	(Wetser et al., 2015)
Factors Affecting the performance of Single-	China	Examinar el efecto de la profundidad del	Factores de profundidad,	La generación de energía	Factores que afectan	(Tamboli & Esvari
Increasing power generation for scaling up single-chamber air	China	Mostrar que la concentración de sustrato tiene un	En este estudio se utilizaron	El aumento del área de superficie	Factores que afectan	(Cheng & Logan, 2012)
Microbial fuel cells: An overview of	UK	Esta revisión se centra	Dado que el crecimiento	Esta revisión proporciona	Tecnologías con	(Slate et al., 2019)
Outlook on the Role of Microbial Fuel Cells in Remediation	Malaysia	En esta revisión, se ha resumido un nuevo enfoque basado en	Después de una revisión de la	Esta revisión se basó en los datos	Tecnologías con descripción	(Yaqoob et al., 2020)
A review of the operating parameters on the microbial fuel		Realizar una revisión bibliográfica	Puede ser muy útil	El rendimiento de MFC está	El rendimiento de MFC está	(Malekmohammadi &
Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell	Korea	El objetivo principal de este documento es abordar un problema	Configuración y elementos de MFC	Se han visto desarrollos considerables	método de optimización	(Elements et al., n.d.)
Nanocoating of microbial fuel cell	Egypto	Este estudio presenta un método para	Las celdas de combustible	De acuerdo con los	Método de rendimiento	(Attia et al., 2022)
Optimization of double chamber microbial fuel cell for	Egypto	El presente estudio abordó la producción de electricidad a	Implementación de las MFC para el	Tanto las condiciones operacionales	Optimización y viabilidad	(Ali et al., 2015)
An insight of bioelectricity	India	“analizar la efectividad y la influencia de la	Uso de celdas microbianas	Se obtuvo como	Tecnologías con	(Munjal et al., 2020)

Referencias utilizadas:

(Zhang et al., 2011), (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021), (En et al., 2011), (Espinoza-montero, 2021), (Nathaly sofia & Soria, 2018), (Mesa, 2017), (Logan et al., 2005) (Catal et al., 2008) (Wetser et al., 2015), (Tamboli & Eswari, 2018), (Cheng & Logan, 2011), (Slate et al., 2019), (Yaqoob et al., 2020), (Malekmohammadi & Mirbagheri, 2021), (Elements et al., n.d.), (Attia et al., 2022), (Ali et al., 2015), (Munjal et al., 2020).

8. CONCLUSIONES

Las celdas de combustible microbiano son una tecnología en auge con aspectos desconocidos en su proceso. Los parámetros que rigen el proceso de la producción de energía eléctrica y depuración de aguas residuales con celdas de combustible microbiano pueden ser considerados una ventaja o desventaja dependiendo de su comportamiento, por ejemplo, el pH cuando se encuentra en valores en el rango de 7 a 9, los procesos son llevados a cabo de manera en la cual las densidades de corriente son las adecuadas, la temperatura, este parámetro tiene sus valores adecuados a altos niveles de temperatura.

Esta revisión se basa en investigaciones de la última década, se ha visto un gran desarrollo en el campo de la tecnología de las CCM mejorando el desarrollo energético, los dispositivos bioelectrónicos y los biosensores no han sido investigados a profundidad. En la depuración de metales tóxicos la ciencia en CCM ha desarrollado en grandes medidas la eliminación de ellos, encontrándose que, en medio ácido, con un electrodo con condiciones permisibles de pH, la densidad eléctrica y la eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales es óptima. Se demostró a través de la literatura que el óxido de grafeno puede ser sustituido con materiales los cuales logran mejorar los rendimientos de las celdas, potenciando su generación eléctrica y remoción de contaminantes, siendo reemplazados por materiales como polímeros con características prolíficas y conductoras, adicional con metales que se ajusten a las necesidades de la celda.

BIBLIORAFIA

- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Islam, N., Parisa, T. A., Rafa, N., Bokhari, A., Klemeš, J. J., & Indra Mahlia, T. M. (2022). Insights into the development of microbial fuel cells for generating biohydrogen, bioelectricity, and treating wastewater. *Energy*, 254(May). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124163>
- Ahn, Y., & Logan, B. E. (2012). A multi-electrode continuous flow microbial fuel cell with separator electrode assembly design. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93(5), 2241–2248. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3916-4>
- Ali, A. E., Gomaa, O. M., Fathey, R., Abd, H., & Kareem, E. (2015). Optimization of double chamber microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and electricity production. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 43(9), 1092–1099. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(15\)30032-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(15)30032-3)
- Alshehri, A. N. Z. (2015). Statistical optimization of pentachlorophenol biodegradation and electricity generation simultaneously in mediator – less air cathode microbial fuel cell. *Journal of Environmental and Applied Bioresearch*, 03(1), 6–15.
- Anaya-Durand, A., & Pedroza-Flores, H. (2008). núms.1-2,1999 31 *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 23(1), 31–39.
- Attia, Y. A., Samer, M., Mohamed, M. S. M., Moustafa, E., & Salah, M. (2022). Nanocoating of microbial fuel cell electrodes for enhancing bioelectricity generation from wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 0123456789, 5–7. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02321-7>
- Bakhshian, S., Kariminia, H. R., & Roshandel, R. (2011). Bioelectricity generation enhancement in a dual chamber microbial fuel cell under cathodic enzyme catalyzed dye decolorization. *Bioresource Technology*, 102(12), 6761–6765. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.060>
- Behera, M., & Ghangrekar, M. M. (2009). Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. *Bioresource Technology*, 100(21), 5114–5121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.020>
- Catal, T., Li, K., Bermek, H., & Liu, H. (2008). *Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells*. 175, 196–200.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.083>

- Cheng, S., & Logan, B. E. (2011). Bioresource Technology Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(6), 4468–4473. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.104>
- De Kwaadsteniet, M., Dobrowsky, P. H., Van Deventer, A., Khan, W., & Cloete, T. E. (2013). Domestic rainwater harvesting: Microbial and chemical water quality and point-of-use treatment systems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(7). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1629-7>
- Elements, M. (2019). *Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications : September*. <https://doi.org/10.3390/en12173390>
- Elements, M., Flimban, S. G. A., Ismail, I. M. I., & Kim, T. (n.d.). *Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications :*
- En, D. E. E., Combustible, C. D. E., Utilizando, M., Residual, A., Entre, A., Efect, E., Dist, D. E. L. A., & Efecto, D. (2011). *Produccion de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos*. 14(1), 5–11.
- Engenharia, E. De. (2012). *Universidade do Minho Escola de Engenharia Luciana de Jesus dos Santos Peixoto Microbial Fuel Cells for autonomous systems : kinetics and technological advances in. February*.
- Espinoza-montero, P. (2021). *Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas*. 4(1), 164–180.
- Ezziat, L., Elabed, A., Ibensouda, S., Abed, S. El, & Lorenzo, M. Di. (2019). *Challenges of Microbial Fuel Cell Architecture on Heavy Metal Recovery and Removal From Wastewater*. 7(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00001>
- Franks, A. E., & Nevin, K. P. (2010). Microbial fuel cells, a current review. *Energies*, 3(5), 899–919. <https://doi.org/10.3390/en3050899>
- Huan, D., Yi-cheng, W. U., Fan, Z., Zong-chuan, H., Zheng, C., & Hui-juan, X. U. (2014). Factors Affecting the Performance of Single-Chamber Soil Microbial Fuel Cells for Power Generation * 1. *Pedosphere: An International Journal*, 24(3), 330–338. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60019-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60019-9)
- Islam, M. A., Ong, H. R., Ethiraj, B., Cheng, C. K., & Rahman Khan, M. M. (2018). Optimization of co-culture inoculated microbial fuel cell performance using response surface methodology.

- Journal of Environmental Management*, 225(December 2017), 242–251.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.002>
- Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110(May), 402–414.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>
- Logan, B. E., Murano, C., Scott, K., Gray, N. D., & Head, I. M. (2005). *Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell*. 39, 942–952.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.019>
- Malekmohammadi, S., & Mirbagheri, S. A. (2021). *A review of the operating parameters on the microbial fuel cell for wastewater treatment and electricity generation*. 84(6), 1309–1323.
<https://doi.org/10.2166/wst.2021.333>
- Mesa, S. A. M. (2017). *Evaluacion de la produccion de energia electrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio*.
- Munjal, M., Tiwari, B., & Lalwani, S. (2020). ScienceDirect An insight of bioelectricity production in mediator less microbial fuel cell using mesoporous Cobalt Ferrite anode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(22), 12525–12534.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.184>
- Ñacato Chicaiza Dayanna Carolina; MSc. Raúl Alfonso Bahamonde Soria. (2018). Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch. *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS CARRERA DE QUÍMICA*.
- Nathaly sofia, B. A., & Soria, D. R. A. B. (2018). *Evaluacion del efecto de polímeros conductores en el tratamient de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas*.
- Peralta, C., Enrique, J., & Rosas, C. (n.d.). *BIOELECTRICIDAD EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS CON DEPURACIÓN SIMULTÁNEA DE AGUA RESIDUAL I ...*
- Residuos, A. D. E., Proceso, D. E. L., & Frutos, D. E. D. D. E. (2022). *Universidad de guayaquil*.
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs):

- Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Rinardo, V. (2018). Microorganismos extremófilos. Psicrófilos y sus mecanismos de adaptación. *Publicaciones Didácticas*, 96, 622–628.
- Saba, B., Christy, A. D., Yu, Z., & Co, A. C. (2017). Sustainable power generation from bacterio-algal microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(January), 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.115>
- Sajana, T. K., Ghangrekar, M. M., & Mitra, A. (2014). Effect of operating parameters on the performance of sediment microbial fuel cell treating aquaculture water. *Aquacultural Engineering*, 61, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.05.004>
- Sharma, Y., & Li, B. (2010). Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), 3789–3797. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.042>
- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A. C., & Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells : An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(March 2018), 60–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>
- Soemari, Y. B., Sapri, Maghfiroh, F., Yuniarti, Achaditani, N. M., Variyani, R., Tsabitah, A. F., Zulkarnain, A. K., Wahyuningsih, M. S. H., Nugrahaningsih, D. A. A., Akmaliyah, M., Syamsul, E. S., Amanda, N. A., Lestari, D., 2021, scmidt iotc, Sumule, A., Kuncahyo, I., Leviana, F., Xue-, W., Kimia, J. T., ... Jubaidah, S. (2020). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2(1), 5–7. <http://jurnal.globalhealthsciencegroup.com/index.php/JPPP/article/download/83/65%0Ahttp://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L603546864%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1155/2015/420723%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76>
- Tamboli, E., & Eswari, J. S. (2018). Microbial fuel cell configurations: An overview. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00016-9>

- Un, D. D. E., Combustible, C. D. E., & Residuales, T. D. E. A. (2014). *Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Ambiental. Ccm.*
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *APPLIED ENERGY*, 137, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.006>
- Wu, C., Liu, X. W., Li, W. W., Sheng, G. P., Zang, G. L., Cheng, Y. Y., Shen, N., Yang, Y. P., & Yu, H. Q. (2012). A white-rot fungus is used as a biocathode to improve electricity production of a microbial fuel cell. *Applied Energy*, 98, 594–596. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.058>
- Yaqoob, A. A., Khatoon, A., Hamidah, S., Setapar, M., & Umar, K. (2020). *Outlook on the Role of Microbial Fuel Cells in Remediation of Environmental Pollutants with Electricity Generation*. <https://doi.org/10.3390/catal10080819>
- Zhang, Y., Min, B., Huang, L., & Angelidaki, I. (2011). Bioresource Technology 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>