Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Variables que afectan el desempeño de una celda microbiana de producción de energía acoplada a un digestor anaerobio: una visión general

Variables affecting the performance of microbial cell for energy production coupled to an anaerobic digester: An overview

López-Alejo, J.E., Elizalde-Martínez, I.

Instituto Politécnico Nacional; Centro Mexicano para la Producción más Limpia; C.P. 07340, Ciudad de México, México.
alejo.jl04@gmail.com; ielizaldem@gmail.com

Innovación tecnológica: Identificación de variables más importantes de una celda microbiana acoplada a un reactor biológico, operando en condiciones anaerobias para producir energía.

Área de aplicación industrial: Energías alternativas, producción más limpia, ingeniería ambiental.

Enviado: 01 abril 2020.
Aceptado: 29 agosto 2020.

Abstract

A review of the factors that affect the performance of a microbial cell coupled to an anaerobic reactor to produce electricity was carried out. It was found that the most frequently reported factors that affect the performance of the system are the number of chambers, the construction materials of the electrodes and their surface area, the type of electrolyte, inoculum and the spacing between electrodes. The criteria for using the different types of construction materials are of an economic nature, while the design and distribution of the internals of the chambers obey the search for the maximization of electron and proton transfer. The reports given do not follow a single trend, since they use a combination of range of the different factors, so it is not possible to adequately compare the energy efficiencies in the different contributions. Based on the findings, certain conditions and dimensions can be visualized to initiate a rational study in this type of cell-reactor systems.

Key words: energy production, water remediation, design variables.

Resumen

Se llevó a cabo una revisión de los factores que afectan el desempeño de una celda microbiana acoplada a un reactor anaerobio, para producir electricidad. Se encontró que los factores reportados con mayor frecuencia que afectan el desempeño del sistema son el número de cámaras, los materiales de construcción de los electrodos y su área superficial, el tipo de electrolito, inóculo y el espaciamiento entre electrodos. Los criterios para usar los diferentes tipos de materiales de construcción son de índole económica, mientras que el diseño y distribución de internos de las cámaras obedecen a la búsqueda de la maximización de transferencia de electrones y protones. Los trabajos reportados no siguen una tendencia única, puesto que utilizan una combinación de intervalos de los diferentes factores, por lo cual no es posible comparar adecuadamente las eficiencias energéticas en las diferentes contribuciones. Con base en los hallazgos se pueden visualizar ciertas condiciones y dimensiones para iniciar un estudio racional en este tipo de sistemas celda-reactor.

Palabras clave: producción de energía, remediación de agua, variables de diseño.

I. Introducción

El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente, inocuo y accesible). La mejora del acceso al agua potable puede proporcionar beneficios tangibles para la salud. Debe realizarse el máximo esfuerzo para lograr que la inocuidad del agua de consumo sea la mayor posible (OMS, Guías para la calidad del agua potable).

La contaminación del agua se define como la introducción de elementos abióticos o bióticos que causen efectos dañinos o tóxicos, perjudiquen los recursos vivos y constituyan un peligro para la salud humana (CONAGUA, 2014). Las aguas residuales son una mezcla compleja donde hay contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos (Glynn-Henry & Heinke, 1999).

El objetivo primordial del tratamiento de aguas residuales consiste en reducir, eliminar o modificar los contaminantes perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. El tratamiento se lleva a cabo en una planta de tratamiento de aguas residuales, en donde se utilizan procesos físicos, químicos y biológicos, principalmente, para mejorar la calidad del recurso hídrico. Estas plantas están constituidas típicamente por las siguientes etapas: el pretratamiento, el tratamiento primario (o clarificación), el tratamiento secundario (biológico), el tratamiento terciario (desinfección) y el procesamiento de los lodos (Glynn-Henry & Heinke, 1999; Ramalho, 2003).

En el tratamiento biológico de aguas residuales, ciertos microorganismos, principalmente bacterias, transforman los sustratos orgánicos (la mayor parte de los residuos orgánicos) a moléculas más simples. Los microorganismos pueden ser aerobios (necesitan oxígeno libre), anaerobios (no requieren oxígeno) o facultativos (crecen con o sin oxígeno).

La población microbiana puede mantenerse en la fase acuosa como crecimiento en suspensión, lo cual se conoce como sólidos en suspensión en licor mixto (SSLM) o solidos volátiles en suspensión en licor mixto (SVSLM), o puede estar adherida a algún medio en forma de película fina o gránulo (Glynn-Henry & Heinke, 1999).

Los reactores aerobios son los más utilizados en el mundo para tratamiento de aguas residuales en la etapa secundaria. En el proceso, la materia orgánica es degradada por la acción de bacterias aerobias las cuales utilizan el oxígeno disuelto en el agua para generar biomasa y agua tratada.

La digestión anaerobia para tratamiento secundario se lleva a cabo en dos fases: En la primera etapa la hidrolisis (licuefacción) de la materia orgánica y su conversión biológica en ácidos orgánicos se produce con rapidez; en la segunda, las bacterias productoras de metano, de crecimiento lento y sensible al entorno, utilizan los ácidos orgánicos para generar un gas compuesto de alrededor de dos tercios de metano y un tercio de CO_2, con trazas de H_2S (Glynn-Henry & Heinke, 1999).

Uno de los reactores biológicos anaerobios más usado en la actualidad es el constituido por un digestor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (RAFA), también conocido como Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), el cual está dividido en tres zonas (Fig. 1) (Ramalho, 2003; Lorenzo & Obaya, 2006; Chong *et al.*, 2012.):

- La zona de lecho de lodos
- La zona de manto de lodos
- La zona de separación sólido–líquido-gas

El agua contaminada ingresa por la parte inferior del reactor, donde comienza su ascenso y tiene contacto con los lodos presentes donde están contenidas las bacterias aglomeradas, formando partículas. Los lodos son arrastrados por el influente creando un espacio de baja turbulencia o suspensión en la zona de manto de lodos. Por último, el fluido con lodos hace contacto con las mamparas de separación liberando el gas adherido a los sólidos. Esto permite además que los lodos regresen de nuevo al fondo, al incrementar su densidad, mientras los gases liberados son enviados a una campana de extracción y el agua tratada sale por la parte superior lateral del reactor.

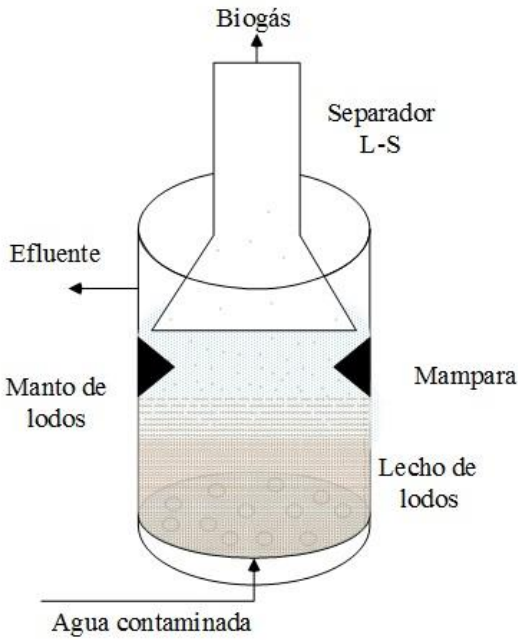


Figura 1. Esquema de un reactor digestor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB), adaptado de Chong *et al*., (2012).

Las reacciones biológicas tienen lugar a lo largo de la zona de manto y lecho de lodos, altamente activas. A medida que el flujo acuoso se desplaza hacia arriba, los compuestos orgánicos volátiles en el afluente se desorben formando el biogás.

La producción de biogás es un proceso natural que se debe a la digestión anaerobia de materia orgánica, obteniéndose como producto una mezcla de CH_4, CO_2 y trazas de otros compuestos como H_2 y H_2S. Este proceso se conoce como metanogénesis y ocurre en el lecho del reactor UASB (Bremauntz *et al.*, 2017; López, 2019).

El biogás generado en los reactores anaerobios puede utilizarse para suministrar energía a una planta de tratamiento de aguas

residuales, reduciendo su dependencia externa para el proceso de remediación de aguas contaminadas o para otras aplicaciones (Bremauntz *et al.*, 2017), principalmente mediante su combustión, una vez purificada la corriente del gas.

La metanogénesis consiste en una serie de reacciones de óxido-reducción que se llevan a cabo en varias etapas e implican la participación de diversas comunidades microbianas en ausencia de oxígeno. Durante el proceso de metanogénesis se pueden distinguir cuatro etapas principales: hidrogénesis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

En la primera etapa las bacterias hidrolíticas utilizan macropolímeros (matera orgánica) como sustrato y los transforman a sus correspondientes monómeros. Estos monómeros se emplean en la segunda etapa donde las bacterias acidogénicas los metabolizan para producir ácidos grasos de cadena corta, así como alcoholes, CO_2, H_2, NH_4^+, H_2S, principalmente. A su vez, las bacterias acetogénicas utilizan estos productos como sustrato, obteniéndose ácido acético, bióxido de carbono e hidrógeno. Por último, las bacterias metanogénicas metabolizan el CO_2 y al grupo metilo del ácido acético para producir CH_4 y H_2O. Además, se produce una reacción simultánea en la cuarta etapa, donde las bacterias sulfatogénicas reducen los SO_4^{-2} producidos en la acetogénesis para obtener H_2S y CO_2 (Rúa-Orozco *et al.*, 2017).

Se ha encontrado que algunos microorganismos que desarrollan este último proceso pueden ser electrogénicos, es decir que durante el proceso técnicamente asistido es posible que se produzca un flujo eléctrico (Bremauntz *et al.*, 2017) debido al cambio del estado de oxidación del azufre de +6 a -2. Este proceso es aprovechado en las celdas de combustible microbianas (CCM's), especialmente por la vía de sulfato-reducción y la producción de hidrógeno.

II. Componentes de las celdas microbianas y su configuración

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM's) son dispositivos que utilizan microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica. Esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de un aceptor natural de electrones como el oxígeno (Revelo et al., 2013).

La estructura base de las CCM's son las celdas de doble cámara. Su funcionamiento es el siguiente: En la cámara anódica, los microorganismos que conforman la biopelícula que recubren el ánodo degradan la materia orgánica, generando electrones los cuales son captados. Los protones generados migran desde el ánodo hasta al cátodo, pasando por la cámara anódica, la membrana selectiva de protones y la cámara catódica. Sobre las paredes del cátodo ocurre una reacción entre los protones y el catolito (generalmente aire o agua aireada), formándose vapor de agua. Una representación esquemática de la CCM se muestra en la figura siguiente (figura 2).

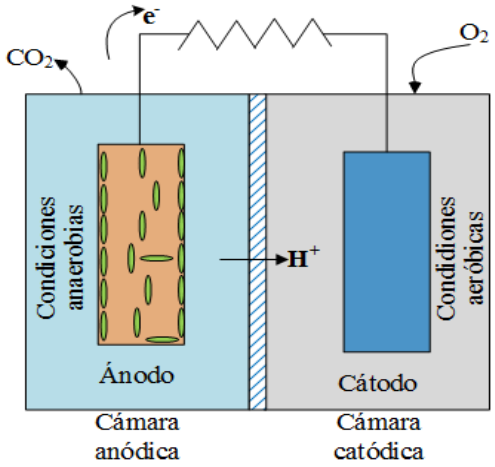


Figura 2. Partes que conforman una CCM de doble cámara, adaptado de Du *et al.*, 2007 y Revelo *et al.*, 2013.

Debido a su capacidad de tratar aguas contaminadas y ser una fuente sustentable de energía, las CCM's han tomado mucho interés entre la comunidad científica, desafortunadamente no se ha logrado trasladar esta tecnología a un ámbito comercial, debido a las limitantes que se describen en este trabajo, las cuales se basaron en un revisión de varias contribuciones proporcionada por distintos autores (Jang *et al*., 2004; Liu & Logan, 2004; Liu *et al*., 2004; Oh *et al.*, 2004; He *et al*., 2005; Min *et al*., 2005; Rabaey *et al*., 2005; Cheng *et al*., 2006; Lowy *et al*., 2006; Oh & Logan, 2006; Ringeisen *et al*., 2006; Du *et al*.,, 2007; Logan *et al*., 2007; Ren *et al*., 2007; Aelterman *et al*., 2008; Dewan *et al*., 2008; ter Heijne *et al*., 2008; Zhao *et al*., 2008; Jiang & Li, 2009; Mahdi Mardanpour *et al*., 2012; Pandit *et al*., 2012; Zhuang *et al*., 2012; Choi & Ahn, 2013; Kang *et al*., 2017; Flores-Sifuentes *et al*., 2018; He *et al*., 2018; Fu *et al*., 2019; Kardi *et al*., 2019; Gajda *et al*., 2020). Se utilizó principalmente el acceso a revistas científicas a través del CONRICyT para descargar los trabajos citados, así como búsqueda abierta en la Web para otras referencias menos específicas. Se utilizaron únicamente trabajos relacionados con la temática explorada en esta contribución y sus palabras clave. A partir de esta indagación, en la Tabla 1 se clasifico la información de acuerdo con los componentes básicos de las CCM's, así como los materiales de construcción más empleados y algunas consideraciones sobre su uso.

Tabla 1. Componentes básicos de las CCM's.

Componente	Materiales	Observaciones
Cámara anódica	Vidrio, Policloruro de vinilo, Policarbonato y Plexiglás	Obligatorio Resistente a la corrosión
Cámara catódica	Vidrio, Policarbonato y Plexiglás	Opcional Resistente a la corrosión
Ánodo	Tela de carbón activado, Fieltro de carbono, Carbón activado granular, Carbón vítreo reticulado, Cepillo de carbón, Tela de carbón, Papel carbón, Fibra de carbono, Grafito granular, Fieltro de grafito, Barras de grafito, Placa de grafito y Discos de grafito liso usando caolín como aglutinante	Obligatorio Alta superficie de contacto Alta porosidad Resistente a la corrosión
Cátodo	Malla de carbono, Papel carbón, Carbón vítreo reticulado, Tela de carbón usando *nafion* como aglutinante, Tela de grafito de alta superficie, Barra de grafito, Placas planas de grafito, Fieltro de grafito, Tela de grafito, Placa de acero inoxidable y Discos de grafito usando caolín como aglutinante	Obligatorio Alta superficie de contacto Alta porosidad Resistente a la corrosión

Anolito (sustrato)	Agua residual sintética, Agua residual doméstica, Sacarosa, Acetato de potasio, Lecho marino, Lactato sódico, Glucosa y acido glutámico	Obligatorio Alta transferencia de electrones (Mediador)
Catolito	Agua, Aire y $K_3Fe(CN)_6$	Obligatorio Alta transferencia de protones (Mediador)
Membrana de intercambio de protones (MIP)	Ultrex CMI-7000, Quick Set Epoxy, Fumasep FKB y Nafion-117	Opcional Solo debe permitir el paso de los protones
Catalizador del ánodo (biopelícula)	*Desulfovidrio* desulfuricans, *Clostridium* cellulolyticum, *Geobacter* sulfurreducens y *Sewanella* oneidensis DSP10	Obligatorio
Catalizador del cátodo	PtO_2, TiO_2 y MnO_2	Opcional

En la Tabla 2 se describen las diferentes configuraciones (como tipo de reactor y operación) de las CCM's, así como las ventajas e inconvenientes que presentan cada una de estas. La configuración más estudiada en la actualidad es la celda de una sola cámara con cátodo al aire, debido a su fácil operación y bajo costo de construcción. Por otro lado, el tipo de CCM menos empleada es la de una cámara sin Membrana de Intercambio de Protones (MIP); este último sistema tiene problemas para evitar la difusión del oxígeno del cátodo al ánodo (Kardi *et al.*, 2019).

Tabla 2. Cuadro comparativo de las diferentes configuraciones de las CCM's.

Tipo de CCM	Operación	Tipo de reactor	Ventajas	Desventajas
De doble cámara	Por lotes	Tipo H y tipo UASB	Es la configuración más ampliamente estudiada y conocida. Mayor control de las condiciones de operación.	El proceso está limitado por el área de la MIP. Su configuración la convierte en el modelo más caro de operar. Falta de un dispositivo para la recolección de gases generados.
	Continuo	Tipo H y tipo UASB		
De una sola cámara sin cámara catódica	Por lotes	Tipo H, PFR y tipo UASB	Reducción en los costos de construcción al no contar con la cámara catódica. Reducción en la operación al usar el aire como catolito. Facilidad de operación.	El proceso se ve limitado por el área de la MIP. Falta de un dispositivo para la recolección de gases generados.
	Continuo	Tipo H, PFR y tipo UASB		
De una sola cámara sin MIP	Por lotes	Tipo H	Reducción de los costos de construcción al no contar con MIP. Reducción de las resistencias de transferencia de protones.	En el caso de airear el cátodo se producen complicaciones para controlar la difusión del oxígeno disuelto hacia el ánodo, causando afectaciones a la biopelícula. Falta de un dispositivo para la recolección de gases generados. Difícil operación.
	Continuo	Tipo UASB		

Las principales variables que afectan la eficiencia de las CCM's son la configuración de las cámaras de reacción, material de los electrodos, electrolitos empleados, procedencia del inóculo, espaciamiento entre los electrodos y el área superficial del ánodo.

Generalmente para estudios de laboratorio se ajustan las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO/L) y de SO_4^{2-}/L en la alimentación de acuerdo con observaciones experimentales y con lo que es factible de hallar en el campo. Como ejemplo en Pérez-Díaz (2016), se usaron 4 mg DQO/L, 6 mg de SO_4^{2-}/L a temperatura ambiente. La temperatura es un factor también que afecta el desempeño del reactor, no solo por la actividad cinética sino por otras variables que resultan afectadas, tales como la viscosidad del agua, la evaporación de la solución, la rapidez de desorción de los gases, favorecimiento de reacciones competitivas, entre otros efectos, incluyendo la dificultad del transporte electrónico.

A continuación, se analizan los efectos reportados y número de reportes en las referencias consultadas desde el 2003 hasta el año 2020 en el desempeño de las CCM's (excepto concentración de materia orgánica y sulfatos, así como temperatura, por ser poco estudiadas sus influencias); posteriormente se describen dichos factores.

III. Factores que afectan el desempeño de CCM's

III.1 Número de cámaras

De acuerdo con la información analizada con relación al número de trabajos publicados, la configuración más empleada en las CCM's es la celda de una sola cámara con cátodo al aire, seguida de la celda de doble cámara, y la configuración menos usada es la celda de una sola cámara sin membrana de intercambio de protones, como se resume en la Figura 3.

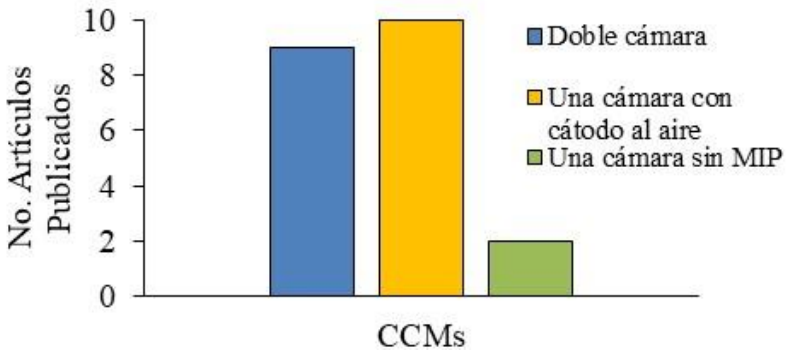


Figura 3. Manejo de configuraciones de CCM's en publicaciones científicas.

Jang *et al.*, (2004) trabajaron con una CCM de una cámara, sin uso de mediadores para la difusión de electrones y empleando únicamente perlas y lana de vidrio para separar los electrodos. En este trabajo generaron una densidad de potencia de 1.3 mW/m^2 con una separación de electrodos de 10 cm y una resistencia de 200 Ω. Por otro lado, empleando la misma CCM con membrana los mismos autores obtuvieron una densidad de potencia de 320 mW/m^2.

Rabaey *et al.,* (2005) reportan haber alcanzado una densidad de potencia de 90,000 mW/m^3 empleando una CCM de una sola cámara con MIP, una matriz de grafito

granular empacada como ánodo, tela de grafito en el cátodo y $K_3Fe(CN)_6$ como electrolito que fluyó por las paredes de la cámara del cátodo.

Por otro lado, Aelterman *et al.*, (2008) utilizaron una CCM de doble cámara, fieltro de grafito empacado como ánodo, una barra de grafito como cátodo y una mezcla de $K_3Fe(CN)_6$, KH_2PO_4 y Na_2HPO_4 como electrolito en la cámara catódica, generando 386,000 mW/m^3. Esto indicaría que el uso de CCM de una y dos cámaras no interfirió mucho en su sistema en la obtención de energía, siendo su mayor ventaja la reducción de costos y facilidad de manipulación al emplear celdas de una sola cámara (Rabaey *et al.*, 2005). Para el caso de las CCM's de una sola cámara sin MIP, se dificulta el control de la difusión del oxígeno, tal como lo reportó Liu y Logan en el 2004 (Liu & Logan, 2004), por lo cual es poco utilizada esta configuración.

Se observa en estos estudios analizados que no hay homogeneidad en cuanto a la medición del desempeño de las celdas, pues se reportan para ello tanto densidad de potencia como potencia por unidad volumen, por lo cual, en ausencia de otros detalles no es posible comparar los desempeños de producción de energía de sus sistemas.

III.2 Tipos de ánodos

De acuerdo con la Figura 4, los electrodos más empleados para el ánodo son los fabricados con tela de carbón, seguida de fieltro de grafito, las placas de grafito y en última instancia el carbón vítreo reticulado.

De manera casi unánime, el uso de compuestos de carbono en sus diferentes fases es el material más utilizado. Las diferentes formas utilizadas, tales como tela, cepillo o placa, permiten mejorar el área de transferencia, aunque también afectan la hidrodinámica del reactor, objeto que no ha sido reportado a nivel experimental debido a su complejidad.

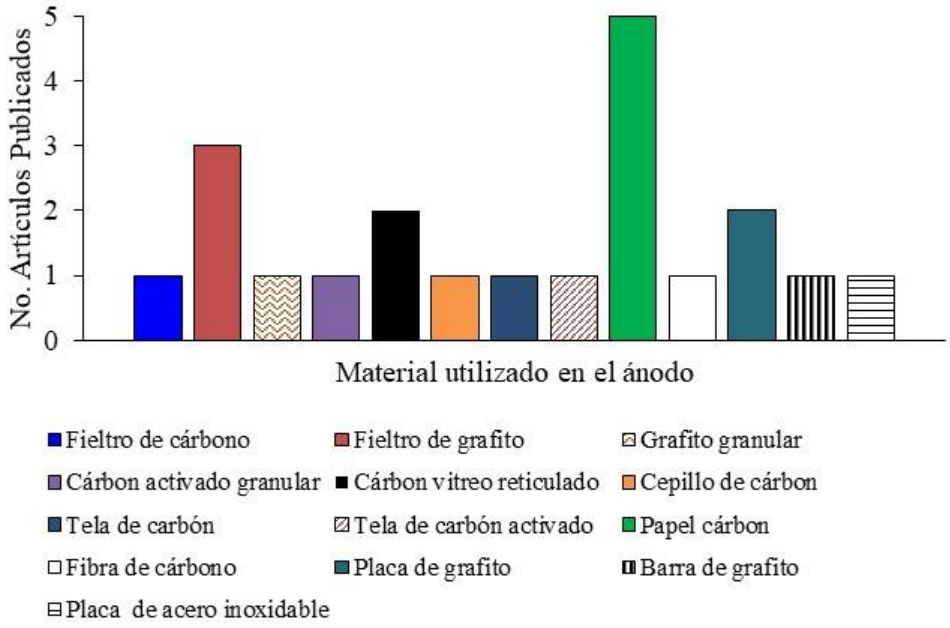


Figura 4. Tipos de material utilizado para el ánodo de CCM's. *III.3 Cátodos para CCM's*.

En la Figura 5 se reportan los cátodos más utilizados en trabajos experimentales. Principalmente se trata de materiales como la tela de grafito y el papel carbón dopados con platino. Por otro lado, los cátodos sin catalizador más empleados son la barra de grafito, el papel carbón, carbón vítreo reticulado y fieltro de grafito.

El uso del platino como agente dopante mejora sustancialmente el proceso de recuperación electrónica, sin embargo, debido a su costo, se ha buscado sustituirlo por otros materiales, tales como el óxido de manganeso. Como se observa, en un mayor número de trabajos se ha optado por utilizar más los materiales derivados del carbono para los electrodos, lo cual es atribuible principalmente a su costo y desempeño razonable en este proceso. Es importante mencionar que la dispersión de los metales, su estado de oxidación, la formación de compuestos derivado de las interacciones con el medio, entre otros factores, influyen en el desempeño de la celda microbiana. Este es un tema que debe estudiarse con mayor profundidad desde el punto de vista fundamental, así como conducir estudios experimentales para validar las hipótesis.

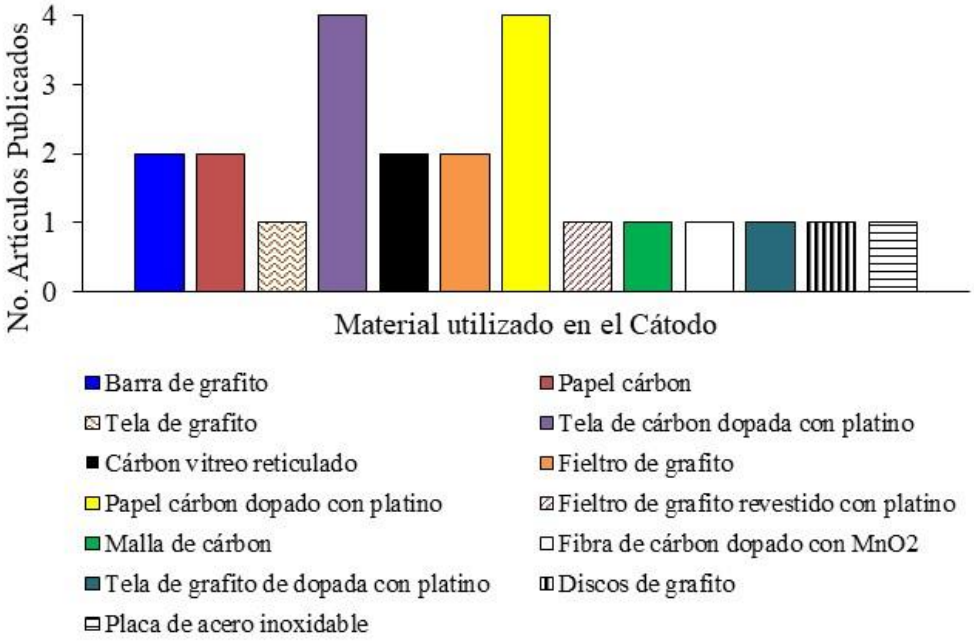


Figura 5. Materiales para cátodos de CCM's.

III.3 Electrolitos

Los electrolitos más empleados para las CCM's en el caso de la cámara catódica son $K_3Fe(CN)_6$, aire y agua aireada. Por otro lado, en la cámara anódica se usan como electrolitos aguas residuales sintéticas (constituidas principalmente por acetato, lactato y glucosa), aguas residuales domésticas y sedimento marino. El detalle respecto a trabajos reportados en cuanto a su número y tipo de electrolito se muestra en la Figura 6.

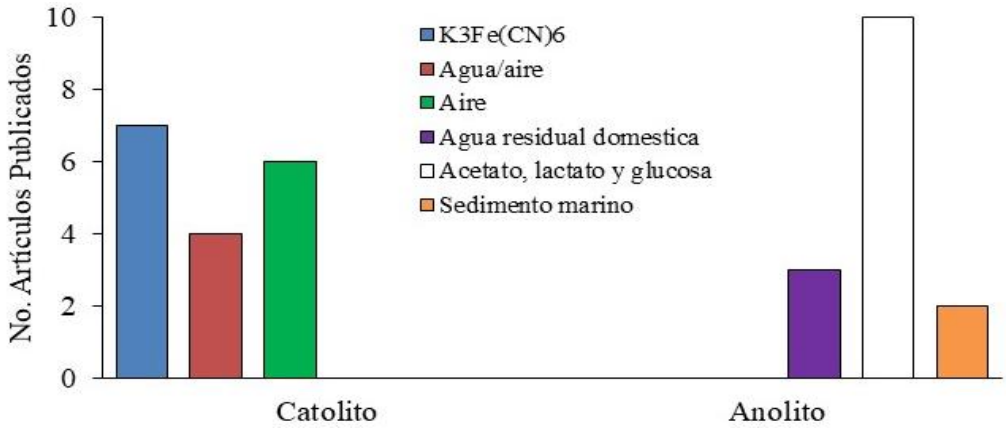


Figura 6. Principales electrolitos utilizados en las CCM's.

En estudios realizados por Pandit *et al.*, (2012) se reportó el empleo de una CCM de doble cámara tipo H, con un volumen de 225 mL para cada cámara, separadas por una membrana de intercambio iónico (*Nafion* y MIA) y placas de grafito reticulado como electrodos, y demostraron que se produce una migración de metabolitos con carga negativa (como acetato, butirato, propionato, etc.) de la cámara anódica a la catódica. Esto se debe a los grupos sulfonatos cargados negativamente en el *Nafion*, responsables de la conductividad eficiente del protón en la CCM. Sin embargo, en las CCM's se encontró que existe una afinidad indeseablemente significativa para otros cationes en lugar de protones, saturando la membrana con estos cationes. Este efecto produce la alcalinidad de la solución y una disminución en la eficiencia de la celda.

III.4 Inóculos

Los microorganismos más empleados provienen de aguas residuales, sedimento marino u otras CCM's que se encuentran en operación. Algunas celdas utilizan microorganismos más específicos como la *Desulfovibrio desulfuricans* o *Clostridium cellulolyticum* y *Geobacter sulfurreducens*. En la Figura 7 se muestran algunos de los inóculos utilizados en relación al número de publicaciones científicas donde reportan su uso.

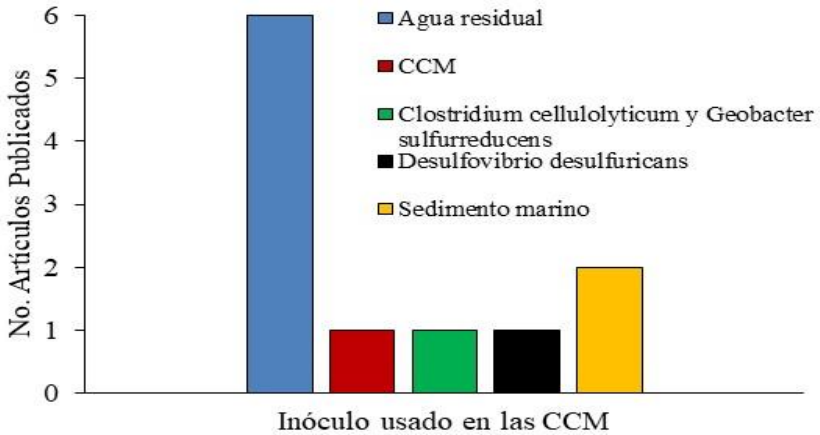


Figura 7. Procedencia del inóculo utilizado en celdas microbianas.

III.5 Espaciado entre electrodos

En relación al espaciamiento entre electrodos, se encontró que cuanto menor es la distancia entre ánodo y cátodo, aumenta la densidad de potencia de la celda. Esto se debe a que, al disminuir la separación de los electrodos, el efecto resistivo que presenta el electrolito al paso de los protones se reduce, para un medio homogéneo.

En la Figura 8 se muestra el detalle de la variación del espaciamiento de electrodos respecto a la densidad de potencia de la celda.

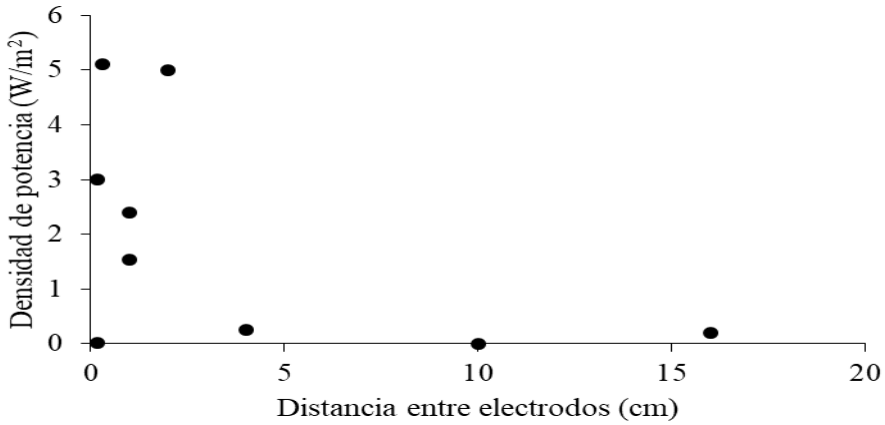


Figura 8. Efecto en espaciamiento entre electrodos en la densidad de potencia.

III.6 Dimensiones del ánodo

En la Figura 9 se muestra como varía la densidad de potencia con respecto a diferentes CCM's, en relación al área superficial del ánodo.

Se puede observar que, conforme aumenta el área superficial del ánodo, disminuye la energía producida por la celda. Lo anterior concuerda con lo reportado por Dewan *et al.* (2008) en donde encontraron que cuando la superficie del ánodo es menor de 10 cm^2, hay un aumento pronunciado en la densidad de potencia reportada.

Se halló también que la disminución de la densidad de potencia no es tan pronunciada entre 10 y 50 cm^2. Superior a este último valor, disminuye considerablemente la potencia generada por la celda (Dewan *et al.*, 2008).

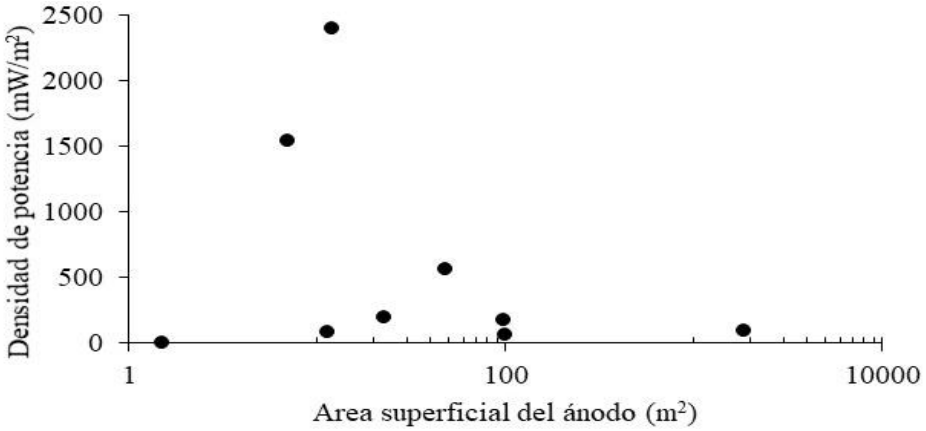


Figura 9. Efecto del área superficial del ánodo con respecto a la densidad de potencia (Dewan, Beyenal, & Lewandowski, 2008).

Los datos recopilados y mostrados en la Figura 9 no emplearon las mismas condiciones de operación (como se ha descrito anteriormente), sin embargo, da una idea del comportamiento global. Además, con la finalidad de poseer información determinante al respecto, hace falta un diseño experimental adecuado, manteniendo las condiciones sin cambios, excepto el área superficial del ánodo para clarificar estas observaciones.

En resumen, los factores que afectan el uso de una CCM tienen que ver con el proceso fundamental de producción de energía, el cual se resume a continuación.

En la cámara anódica las bacterias sulfato-reductoras (BSR) consumen la materia orgánica (como acetato y butirato) para su proceso metabólico y emplean SO_4^{2-} y S^0 como aceptores finales de electrones, generando HS^- como producto final.

Luego, el HS^- es oxidado por el ánodo donando 2 e^- y generando S^0. Posteriormente, éste es oxidado por las bacterias sulfuro-oxidativas (BSO) regenerando el SO_4^{2-} y entregando 6 e^- al ánodo. Por otro lado, en la cámara catódica el H^+ reacciona con el O_2 del aire formando H_2O y oxidando al electrodo, como se muestra en la Tabla 3 y en la Figura 10 (Pérez, 2016).

Por todo lo planteado anteriormente, es justificable indagar las causas de las pérdidas de potencial que afectan el desempeño de las CCM's, realizando un seguimiento y documentación detallados del proceso en cuestión, con la finalidad de proponer un sistema que considere factores que podrían hacerlas más eficiente, con relación a los sistemas reportados.

Tabla 3. Secuencia de reacciones llevadas a cabo en una CCM con bacterias sulfato-reductoras.

Reacción	Cámara
$CH_3COO^- + SO_4^{2-} \rightarrow 2\,HCO_3 + HS^-$	Anódica
$CH_3CH_2CH_2COO^- + \frac{1}{2}\,SO_4^{2-} \rightarrow 2\,CH_3COO^- + \frac{1}{2}\,HS^- + \frac{1}{2}\,H^+$	Anódica
$4\,H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4\,H_2O$	Anódica
$HS^- \rightarrow H^+ + S^0 + 2\,e^-$	Anódica
$4\,H_2O + S^0 \rightarrow 4\,SO_4^{2-} + 8\,H^+ + 6\,e^-$	Anódica
$O_2 + 4\,H^+ \rightarrow 2\,H_2O$	Catódica

Como ha podido constatarse de la revisión realizada con respecto a las variables que afectan el desempeño de una celda de combustible microbiana, estas celdas presentan problemas de transferencia de protones y electrones debido a un diseño deficiente, siendo esto observado al momento de reproducir su comportamiento, así como al escalar los equipos a diferentes niveles. Esto depende de la configuración de la celda, de los materiales utilizados, de la disponibilidad de la materia prima, flujos, concentraciones, incluso materiales de construcción tanto de la cámara donde se llevan a cabo las reacciones como de los conductores de electrones.

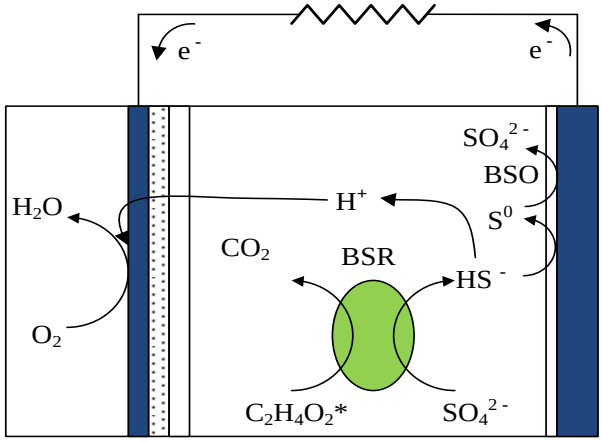


Figura 10. Mecanismo de reacción en una CCM con bacterias sulfato-reductoras.

Dada la gran cantidad de variables involucradas y que los resultados hallados que fueron producidos en una variedad de condiciones, en algunos casos con los detalles no reportados, es necesario conducir un estudio sistemático de las variables, tomando como base los reportes existentes y una serie de suposiciones racionales para obtener eficiencias esperadas, y costos apropiados.

IV. Observaciones generales sobre diseños de celdas

Con relación a lo anterior, se mencionan a continuación algunas observaciones generales sobre el diseño de una celda acoplada a un digestor UASB, con la finalidad de tener un mejor control en los sistemas estudiados, mediante el uso de los parámetros que dieron mejores resultados en las investigaciones previas.

- Utilizar una celda de combustible microbiana de un solo cuerpo, cámara anódica dentro del cuerpo, con cámara catódica al aire; emplear asimismo un área limpia de transferencia de protones de los más eficiente posible (entre 10-50 cm^2); procurar mantener la distancia entre electrodos, de 1-5 cm.
- Construir las cámaras del reactor que permita al menos el 50% del área efectiva de transferencia de protones con respecto al área del cátodo.
- Construir los electrodos manteniendo una relación 1:2 entre el área superficial del ánodo y el cátodo, para asegurar que el electrodo limitador sea él ánodo, como ha sido recomendado en los trabajos analizados.
- Tomar la mayor cantidad de información del sistema, tal como la cinética y de condiciones de operación de un digestor experimental ya existente, para en primera instancia replicar su desempeño y luego utilizar esa información para incorporarla al nuevo diseño. Con relación al volumen de las cámaras, debe ser similar al sistema de referencia inicial, para que no interfiera en gran medida el efecto del escalamiento.
- Realizar pruebas de desempeño del nuevo sistema y documentar el funcionamiento para posteriormente realizar ajustes y mejoras al sistema (López, 2019).

Un sistema CCM acoplado a un reactor de remediación de aguas, parece una buena alternativa para lograr un doble propósito de remediar aguas contaminadas y producir energía. Sin embargo, estos sistemas son bastante complicados y un diseño determinista no es posible con el estado del arte. En lugar de ello, hay una gran cantidad de información dispersa que podría utilizarse para hacer propuestas de mejora de las CCM's.

Con la finalidad de aprovechar la información disponible para un diseño adecuado, es necesario comenzar con diseños reportados utilizando los parámetros que han proporcionado las mejores eficiencias. Sin embargo, tal y como se vio durante este estudio y las referencias reportadas, al ser un sistema con muchas variables, incertidumbres y sujeto a cambios continuos por la evolución de las poblaciones y cambio en tamaño de partículas, así como otros procesos de pérdida de eficiencias locales, el diseño de un sistema de esta naturaleza siempre debe validarse con mediciones experimentales, mismas que sirvan para realimentar el diseño.

Los diseños de CCM's deben ser flexibles en sus componentes y configuración para que puedan ensayarse cambios que permitan explorar diferentes alternativas conducentes a la mejor operación de la celda. Por ello, se propone que los componentes de las cámaras sean desarmables y haya suficiente espacio en la cámara anódica para variar el diseño del ánodo. Los materiales de menor costo son los que deben utilizarse en cada etapa, y solo después de su estudio experimental, valorar utilizar otros materiales de mayor costo.

V. Conclusiones

Los sistemas formados por celdas de combustible microbianas acopladas a reactores de tratamiento de aguas tienen un alto potencial para remediar agua contaminada y al mismo tiempo aprovechar la energía eléctrica generada durante el tratamiento del efluente, la cual puede ser empleada para suministrar parte de la energía que se requiere en las plantas de tratamiento de aguas residuales o para otras aplicaciones de bajo consumo energético.

Con la finalidad de investigar los factores que intervienen y limitan la eficiencia de la producción energética de las celdas microbianas, es necesario construir una celda que permita un estudio detallado de este tipo de sistemas, asegurando un control adecuado sobre las variables, las cuales deben estar accesibles para su medición y deben ser representativas para poderse comparar con otros sistemas.

Dada la complejidad de los sistemas de este tipo, para su construcción se requiere partir de parámetros óptimos ya reportados y de un análisis de los mismos debido a que en muchas situaciones los reportes son contradictorios y la mejora de los sistemas no puede atribuírsele a un solo factor, sino a un efecto sinérgico entre varios de ellos, que se cambian entre los diferentes estudios.

Se plantea como partida de diseño, basándose en esta revisión una celda de combustible microbiana de un solo cuerpo de reactor, con cámara catódica al aire, y anódica dentro del sistema, empleando bacterias sulfato-reductoras ya probadas en el laboratorio, un área efectiva de transferencia de protones de 10-50 cm^2 y reduciendo la distancia entre electrodos entre 1 a 5 cm. Se recomienda reportar la eficiencia de recuperación de electrones como una densidad de potencia.

Lo anterior con la finalidad de hacer una validación de la información reportada y dar pasos al desacoplamiento de factores con la finalidad de estudiarlos, en la medida de lo posible, por separado. Esto permitirá no solo

tener una mejor comprensión del efecto de las variables y los parámetros de diseño, sino sentará las bases para prototipos experimentales adecuados para estudiar el efecto de innovaciones en los diferentes componentes de las CCM's.

VI. Agradecimientos

J.E. López-Alejo agradece al CONACyT-México por la beca proporcionada para sus estudios de maestría (No. beca 495008 y No. de Registro 638952).

VII. Referencias

OMS. (s.f.). *Guías para la calidad del agua potable.* Recuperado el 12 de 10 de 2017, de Organización Mundial de la Salud: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_fulll_lowsres.pdf.

CONAGUA. (2014). *Estadísticas del Agua en México.* México: Comisión Nacional del Agua. México: Autor.

Glynn Henry, J., & W. Heinke, G. (1999). *Ingeniería ambiental.* México: Pearson Educación.

Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de aguas residuales.* España: Editorial Reverté.

Lorenzo, Y., Obaya M.A. (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. *Generalidades. ICIDCA* XL (1), 13-21.

Chong, S., Sen, T. K., Kayaalp, A., & Ang, H. M. (2012). The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment – A state-of-the-art review. *Water Research, 46*(11), 3434-3470.

Bremauntz-Michavila, M. P., Guerrero-Barajas, C., Sánchez-Pérez, R., & Monterrubio-Badillo, M. C. (2017). Tratamiento de efluentes industriales: potencial fuente de energía en celdas de combustible microbianas (CCM). [Comunicación privada]. 1-11.

López, J.E. (2019). *Diseño, construcción y evaluación de un sistema bioeletrogénico de tratamiento sustentable de aguas residuales*. Tesis de Maestría no publicada. México: IPN.

Rúa-Orozco, D. J., Lora, E., & Mambeli-Barros, R. (26 de 11 de 2017). *Procesos biológicos de conversión.* Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/312535899_fig3_Figura-44-Distribucion-del-proceso-de-digestion-anaerobia-entre-los-grupos-microbianos.

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. *Información Tecnológica, 24*(6), 17-28.

Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S., & Kim, B. H. (2004). Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochemistry (1991), 39*(8), 1007-1012.

Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science & Technology, 38*(14), 4040-4046.

Liu, H., Ramnarayanan, R., & Logan, B. E. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, *38*(7), 2281-2285.

Oh, S., Min, B., & Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, *38*(18), 4900-4904.

He, Z., Minteer, S. D., & Angenent, L. T. (2005). Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, *39*(14), 5262-5267.

Min, B., Kim, J., Oh, S., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2005). Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Research (Oxford)*, *39*(20), 4961-4968.

Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., & Verstraete, W. (2005). Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. *Environmental Science & Technology*, *39*(20), 8077-8082.

Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, *40*(7), 2426-2432.

Lowy, D. A., Tender, L. M., Zeikus, J. G., Park, D. H., & Lovley, D. R. (2006). Harvesting energy from the marine sediment-water interface II. Kinetic activity of anode materials. *Biosensors and Bioelectronics*, *21*(11), 2058-2063.

Moon, H., Chang, I. S., & Kim, B. H. (2006). Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *Bioresource Technology, 97*(4), 621-627.

Oh, S., & Logan, B. E. (2006). Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *70*(2), 162-169.

Ringeisen, B. R., Henderson, E., Wu, P. K., Pietron, J., Ray, R., Little, B., . . . Jones-Meehan, J. M. (2006). High power density from a miniature microbial fuel cell using *shewanella oneidens*is DSP10. *Environmental Science & Technology*, *40*(8), 2629-2634.

Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, *25*(5), 464-482. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.05.004.

Dumas, C., Mollica, A., Féron, D., Basséguy, R., Etcheverry, L., & Bergel, A. (2007). Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials. *Electrochimica Acta, 53*(2), 468-473.

Logan, B., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology, 41*(9), 3341-3346.

Ren, Z., Ward, T. E., & Regan, J. M. (2007). Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined

binary culture. *Environmental Science & Technology, 41*(13), 4781-4786

Aelterman, P., Versichele, M., Marzorati, M., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes. *Bioresource Technology, 99*(18), 8895-8902.

Dewan, A., Beyenal, H., & Lewandowski, Z. (2008). Scaling up microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology, 42*(20), 7643-7648.

ter Heijne, A., Hamelers, H. V. M., Saakes, M., & Buisman, C. J. N. (2008). Performance of non-porous graphite and titanium-based anodes in microbial fuel cells. *Electrochimica Acta, 53*(18), 5697-5703.

Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J. R., Chandra, A., Avignone-Rossa, C., Thumser, A. E., & Slade, R. C. T. (2008). Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology, 42*(13), 4971-4976.

Jiang, D., & Li, B. (2009). Granular activated carbon single-chamber microbial fuel cells (GAC-SCMFCs): A design suitable for large-scale wastewater treatment processes. *Biochemical Engineering Journal, 47*(1), 31-37.

Mahdi Mardanpour, M., Nasr Esfahany, M., Behzad, T., & Sedaqatvand, R. (2012). Single chamber microbial fuel cell with spiral anode for dairy wastewater treatment. *Biosensors & Bioelectronics, 38*(1), 264-269.

Pandit, S., Ghosh, S., Ghangrekar, M. M., & Das, D. (2012). Performance of an anion exchange membrane in association with cathodic parameters in a dual chamber microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy, 37*(11), 9383-9392.

Zhuang, L., Zheng, Y., Zhou, S., Yuan, Y., Yuan, H., & Chen, Y. (2012). Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment. *Bioresource Technology, 106*, 82-88.

Choi, J., & Ahn, Y. (2013). Continuous electricity generation in stacked air cathode microbial fuel cell treating domestic wastewater. *Journal of Environmental Management, 130*, 146-152.

Kang, H., Jeong, J., Gupta, P. L., & Jung, S. P. (2017). Effects of brush-anode configurations on performance and electrochemistry of microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*(45), 27693-27700.

Flores-Sifuentes, J., Sánchez-Cardona, K. V., Acosta-Arreazola, F., Sánchez-Domínguez, M., Garza-Tovar, L. L., Sepúlveda-Guzmán, S., . . . Sánchez, E. M. (2018). Preparation of CuO/CNF composite and its performance as anode in a microbial fuel cell with *shewanella oneidensis* in a half cell configuration. *Journal of Materials Science. Materials in Electronics, 29*(18), 15784-15794.

He, R., Liu, L., Shi, P., & Nie, C. (2018). Environmental decontamination using photocatalytic fuel cells and photoelectrocatalysis-microbial fuel cells: Environmental decontamination using photocatalytic fuel cells. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology (1986), 93*(11), 3336-3346.

Fu, B., Xu, T., Guo, X., Liang, P., Huang, X., & Zhang, X. (2019). Optimization and simulation of a carbon-based flow-through composite anode configuration to enhance power generation and improve effluent quality simultaneously for microbial fuel cells. *Journal of Cleaner Production, 229*, 542-551.

Kardi, S. N., Ibrahim, N., Rashid, N. A. A., & Darzi, G. N. (2019). Investigating effect of proton-exchange membrane on new air-cathode single-chamber microbial fuel cell configuration for bioenergy recovery from azorubine dye degradation. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(21), 21201-21215.

Gajda, I., Obata, O., Jose Salar-Garcia, M., Greenman, J., & Ieropoulos, I. A. (2020). Long-term bio-power of ceramic microbial fuel cells in individual and stacked configurations. *Bioelectrochemistry, 133*, 107459.

Pérez-Díaz, M. I. (2016). *Generación de energía eléctrica a partir del proceso de reducción de sulfato en un reactor UASB.* Tesis de Maestría no publicada. México: IPN.