

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica
por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una
Revisión**

Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería
Ambiental

Autor:

Nady Sadith Lumba Idrogo

Lizet Deysi Porras Pizarro

Asesor:

Mg: Joel Hugo Fernández Rojas

Lima, 23 de diciembre del 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

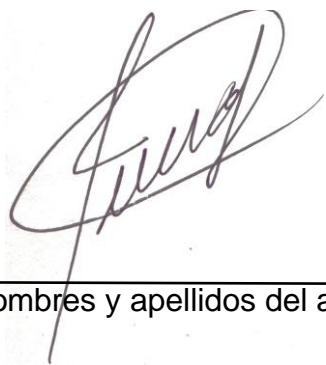
Joel Hugo Fernández Rojas, de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD A PARTIR DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA POR EL MÉTODO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (CCM): UNA REVISIÓN”** constituye la memoria que presenta las estudiantes Nady Sadith Lumba Idrogo y Lizet Deysi Porras Pizarro, para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima a los 23 días del mes de diciembre del año 2020.



Nombres y apellidos del asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a..... 23..... día(s) del mes de..... diciembre.....del año 2020.... siendo las... 10:00.. horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a): Ing. Nancy Curasi Rafael....., el (la) secretario(a): ... Ing. Jocelyn Dianella Torres Guerra..... y los demás miembros: Ing. Cesar Asbel Aranda Castillo.....y el (la) asesor(a) con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado: Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una Revisión..... de los (las) candidato (as): a) Nady Sadith Lumba Idrogo..... b) Lizet Deysi Porras Pizarro..... c)..... conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en: Ingeniería Ambiental..... (Continuación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): Nady Sadith Lumba Idrogo.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	Muy bueno	Sobre saliente

Candidato/a (b): Lizet Deysi Porras Pizarro.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	16	B	Bueno	Muy bueno

Candidato/a (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(* Ver parte posterior)

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a  Asesor/a  Candidato/a (a)	Secretario/a  Miembro  Candidato/a (b)	Miembro Candidato/a (c)
---	--	--------------------------------

Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una Revisión

BIOELECTRICITY GENERATION FROM DOMESTIC WASTEWATER BY MICROBIAL FUEL CELL (MFC) METHOD: A REVIEW

Lumba Idrogo Nady ^{a1}, Porras Pizarro Lizet ^a

Universidad Peruana Unión (UPeU) Ingeniería Ambiental Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Carretera Central Km.19.5 Ñaña-Chosica

Resumen

En los últimos años la demanda de energía eléctrica en el mundo se ha incrementado, la cual ha sido atendida por fuentes de energía sustentable con nuevas tecnologías, siendo una de ellas la bioelectricidad empleando agua residual doméstica. El objetivo de esta investigación es revisar la información concerniente a la generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método de celdas de combustible microbiano (CCM). Esta revisión está basada en los datos de energía de las publicaciones sobre CCM investigados continuamente durante los últimos 13 años. Se revisaron 59 estudios a nivel mundial, de los cuales 13 se analizaron, las revistas indexadas para esta revisión son ScienceDirect, SciELO, CONCYTEC, entre otras. Se encontraron tres tipos de CCM: Cámara única, que involucra solo la cámara anódica con un cátodo de aire al que se transfiere los protones y electrones, la de cámara doble que consiste en compartimientos de ánodo y cátodo, y las apiladas conformadas por varias celdas conectadas en serie o en paralelo. A partir de la revisión de la literatura reciente se encontró que la generación de bioelectricidad empleando las CCM como tecnología emergente, aprovechando el agua residual domésticas es una propuesta muy ventajosa y puede aplicarse en diversos sectores. La más empleada es la de cámara doble tipo H, por ser más eficiente y económica y son utilizadas a escala laboratorio en condiciones anaerobias, este tipo de celdas están en continua investigación con un fin de mejorar el diseño para incrementar la generación de electricidad.

Palabras clave: Celdas de Combustible Microbiano, Bioenergía, Aguas residuales doméstica, electrodos.

Abstract

In recent years the demand for electrical energy in the world has increased, which has been met by sustainable energy sources with new technologies, one of which is bioelectricity using domestic wastewater. The objective of this research is to review the information with the project is concerned with the generation of bioelectricity from domestic wastewater by the microbial fuel cell (MFC) method. This review is based on energy data from MCC publications that have been continuously researched over the past 13 years. Fifty studies were reviewed worldwide. The journals indexed for this review are ScienceDirect, SciELO, CONCYTEC, and the CRAI of the Universidad Peruana Unión. Three types of MCCs were found: single chamber, which involves only the anodic chamber with an air cathode to which protons and electrons are transferred, double chamber consisting of anode and cathode compartments, and stacked cells connected in series or parallel. From the review of recent literature, it was found that the generation of bioelectricity using MCCs as an emerging technology, taking advantage of domestic wastewater is a very advantageous proposal and can be applied in various sectors. The most used is the double chamber type H, because it is more efficient and economical and they are used at laboratory scale in anaerobic conditions, this type of cells are in continuous research with the purpose of improving the design to increase the generation of electricity.

Key words: Microbial Fuel Cells, Bioenergy, Domestic wastewater, electrodes.

Introducción

La electricidad está definida como el movimiento de electrones que se trasladan por un conductor eléctrico durante un periodo determinado, la fuerza física o presión que induce dicho movimiento se le denomina voltaje, y su unidad de medida es el voltio (v) (Bioimpedance, 2013). Según la Dirección General de Energía Eléctrica y el Servicio Público de Electricidad de Córdoba (SPEC) las energías renovables son el flujo de energía que se produce de forma natural y continua, al igual que la bioelectricidad, la inversión en energías renovables ayuda a reducir la dependencia del petróleo al generar energía limpia (SPEC, 2011).

Las aguas residuales son aquellas aguas cuyas características originales han sido alteradas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado, y las aguas residuales domésticas son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (OEFA, 2014). Debido a la gran cantidad de materia orgánica en las aguas residuales, y según las últimas investigaciones realizadas a escala de laboratorio, las aguas residuales se consideran una fuente para la generación de energía (Bermúdez & Bernal, 2018).

Por otro lado Franco & Vargas (2018), indica que una Celda de Combustible microbiano (CCM) es un sistema bioelectroquímico que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en el agua residual (sustrato) en energía eléctrica, A su vez estas pueden ser utilizadas como estrategia para tratar aguas residuales contaminadas y generar bioelectricidad (Cortazar,2016).

Frente al déficit de la energía actual, en el mercado hay un crecimiento de demanda de energías renovables, como es el caso de la energía solar, eólicas, etc, pero aún la oferta es insuficiente, la producción eléctrica convencional diaria en los principales mercados de Europa está en descenso, entre los años 2008 a 2016 muestra una reducción de 50% en Alemania, Francia e Italia, mientras que en España es aproximadamente de 33% (Bublitz et al, 2019).

Por otro lado, en China conocida por tener el sistema energético más grande del mundo, también pasan por esta crisis (China Electricity Council, 2011). En los años 2016 a 2018 el consumo eléctrico disminuyó en 8 %, (National Bureau of Statistics of China, 2019). Es por ello que este país opta por la energía limpia, teniendo como meta para 2030 incrementar en 20 % de energía de fuentes no convencionales (Ma & Fu, 2020)

En Perú en pleno siglo XXI, el sector eléctrico viene desempeñando un papel crucial, en la actualidad entre los meses de enero a mayo de 2020 la producción total de energía eléctrica a nivel nacional, fue de 15,757 GWh (Gigavatio-hora), valor que es menor en 25% a la producción del año 2019 en los mismos meses (Nacional, 2020), muestra que hay menor producción cuando existe una demanda mayor, respecto a los Recursos Energéticos Renovables (RER) no convencionales, las unidades solares incrementaron su producción de 57 a 59 GWh; mientras que, la producción de las unidades eólicas decreció 8% respecto al 2019 (Nacional, 2019).

Según Gamio (2017) la problemática de la energía en el Perú tiene varios aspectos, por un lado, la búsqueda de qué tipo de energía es la más apropiada, eficiente o económica, por otro existen grandes carencias pues hay casi 3,000.000 de personas sin acceso a energía.

El presente artículo tiene como objetivo la recopilación de información sobre la generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método de celdas de combustible microbiano (CCM).

Marco Teórico

En esta investigación se referenció 59 artículos de los cuales 13 se analizaron respecto a la configuración y características de Celdas de Combustible Microbiano, esto es para tener un panorama mucho mayor, todas las citas son de revistas indexadas como por ejemplo ScienceDirect, SciELO, Freefullpdf, el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), como también el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la Universidad Peruana Unión (UPeU)- Lima.

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso que requiere mucha energía, no sólo debido a las grandes cantidades de contaminantes, sino también para los grandes volúmenes de agua a tratar, que se generan principalmente por actividades humanas y diferentes industrias, (Muñoz et al., 2020).

Los tratamientos biológicos de aguas residuales se han convertido en sustitutos de las tecnologías actuales, debido a la mejora de la eficiencia del tratamiento, las CCM surgieron como una solución viable para la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) a su vez presentan beneficios ambientales y sociales como la generación de electricidad, para la recuperación de energía a bajos costos de operación, (Enamala et al., 2020) . Estos sistemas son capaces de tratar aguas residuales de una amplia gama de orígenes como urbano, industrial o agrícola, debido a sus bajos requerimientos energéticos y su fácil operación y mantenimiento, estas

se han convertido en una alternativa para el saneamiento de pequeñas comunidades, (Corbella & Puigagut, 2018).

Aguas Residuales Domésticas (ARD)

Las Aguas Residuales Domésticas (ARD) son originadas en domicilios, que hacen referencia a las usadas en (cocinas, baños, lavanderías, etc.), radican básicamente en residuos humanos que arriban a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de las edificaciones (Ocola, 2010), (Díaz et al., 2012). Estas provienen de las actividades diarias y presentan un alto contenido de materia orgánica, detergentes y grasas (Gadini, 2009).

Ñacato (2018) reporta que las ARD al estar constituidas por compuestos orgánicos presentan altos valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO), estas aguas tienen efectos negativos en la salud y al ambiente. Las celdas de combustible microbiano, utilizando los compuestos orgánicos de las ARD, hacen posible la producción de energía no convencional (García et al., 2017).

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental del Perú (OEFA) indica que las propiedades originales del agua potable fueron alteradas por acciones humanas, de este modo las ARD, por su condición, requieren un tratamiento previo antes de ser reusadas, evacuadas a un cuerpo natural de agua o almacenarlas al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

Composición del agua residual doméstica

Mayo (2010) indica que en las ARD contienen básicamente desechos humanos, que poseen un mal olor y de degradación rápida, constituidos de carbohidratos como almidón, azúcares y fibras celulósicas que provienen de los desperdicios y excretas humanas (Nitrógeno y Fosforo), así también celulosa, grasas, jabones.

Los contaminantes inorgánicos son de fuente mineral, tienen diferentes orígenes y están compuestos por ácidos, sales, metales, óxidos y bases inorgánicas que se encuentran en cantidades grandes en las aguas residuales (Sousa, 2010). También hay partículas de arena de tamaño variado, que se encargan de enturbiar las masas de aguas residuales cuando están en movimiento y cuando están estancadas forman depósitos de lodos (Sousa, 2010).

Bioelectricidad

La bioelectricidad es la energía generada a partir de fuentes renovables usando recursos como es el agua, sol, aire, así mismo es compatible con el medio ambiente porque no emite contaminantes (Elshobary et al., 2020).

La electricidad puede ser producida por las Celdas de Combustible Microbianas (CCM), la cual consiste en un dispositivo que emplea microorganismos existentes en el sustrato para la transformar energía química en energía eléctrica, ciertos microorganismos trasladan electrones generados en su actividad metabólica a un Ánodo (celda sin contenido de oxígeno), (Revelo et al., 2013). Este método ayuda a descomponer la materia orgánica representada como sustrato y ha sido estudiado ampliamente en CCM de cátodo (pila eléctrica que contiene oxígeno) para la generación de energía eléctrica a pequeña escala (Pant et al., 2010). Por otro lado, Valencia (2018) menciona que la tecnología CCM, puede producir electricidad a partir de la oxidación de compuestos orgánicos o inorgánicos presentes en ARD, de esta manera las CCM presentan un tratamiento sostenible y efectivo obteniendo una potencia de 42 mA/m² (miliamperios/ metro cuadrado).

Oblitas & Perez (2018) relatan que la implementación de una CCM a escala laboratorio para la generación electricidad reduce el valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), porque es un parámetro que permiten evaluar la calidad del agua, y se determina por la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica.

Huamán (2020) indican que hay existen varios tipos de CCM como las de dos cámaras tipo H, de cámara simple, cátodo de aire, de tipo tubular, apiladas, entre otras. La configuración de CCM más empleadas son las de doble cámara tipo H, ya que se usa para experimentos de escala laboratorio, debido a su sencilla configuración, esta configuración se puede utilizar para estudiar parámetros primordiales como el estudio de nuevas comunidades microbianas a condiciones anaeróbicas, construida en vidrio, electrodos de placa de grafito y agua residual doméstica con inóculos de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, dando como resultado mayor producción de energía (Oblitas & Perez, 2018). Estos investigadores obtuvieron una energía promedio de 185.44 mV y 294.17 mV, y la disminución de DQO de 12.24 %, estos valores indican que empleando dicho dispositivo se obtienen resultados eficientes.

En la primera década del siglo XXI, las investigaciones realizadas sobre este sistema de las CCM, crecieron de manera significativa explorando diferentes aspectos de los diseños compactos con relación al volumen de las celdas, evaluación de diferentes materiales para los electrodos y la caracterización de los consorcios de bacterias exoelectrogénicas con mejores resultados eléctricos (James et al., 2020). Franco & Ricaute (2018) encontraron que los factores de la configuración del

reactor influyen en el desempeño de los electrodos y que el enriquecimiento de varios tipos de microorganismos optimiza la producción energética de las CCM.

Principio de la celda de combustible microbiano

Las CCM se diferencian de otros sistemas como las termoeléctricas, hidroeléctricas, eólicas, etc., por que operan de manera eficiente, e incluso este sistema a temperatura ambiente e incluso a temperaturas muy bajas, generan menor cantidad Dióxido de Carbono (CO_2), con una reducción de 50 % a comparación que otra tecnología actual que emplean combustibles fósiles para la generación de energía, por lo que las pocas emisiones de este gas no necesitan ningún tratamiento; de este modo puede ser usada en el futuro en los lugares más remotos donde carezcan de energía eléctrica (Figura 3) (Revelo et al., 2013).

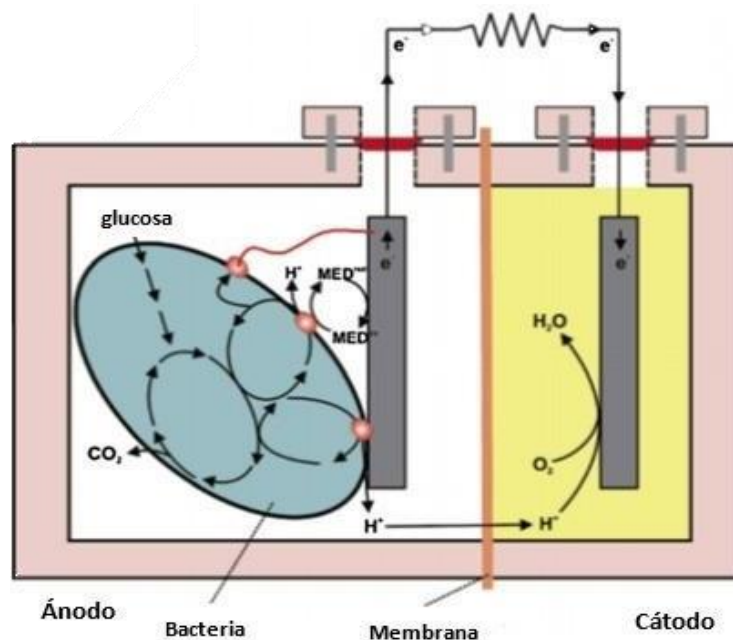


Figura 3. Principios de las Celdas de Combustible Microbiano (no a escala) (Rahimnejad et al., 2015)

En los últimos años ha evolucionado el uso de biocátodos o cátodo microbiano, este es diferente de los cátodos abióticos, porque usan microorganismos como biocatalizadores para aceptar electrones a partir de cátodo y así reemplazar el uso de catalizadores costosos, los biocátodos son de dos tipos: biocátodos aeróbicos que usan oxígeno como el oxidante y microorganismos que asisten la oxidación de compuestos metálicos de transición, tales como Mn^{+2} o Fe^{+2} , para la entrega de electrones al oxígeno; y los biocátodos anaeróbicos que usan diferentes compuestos como aceptores terminales de electrones, tales como: NO_3^- , SO_4^{2-} , Mn^{+2} ,

Fe²⁺, SeO₂⁻⁴, AsO₄⁻³, ClO₄⁻, U, Cr, H, CO₂, entre otros, estos biocátodos son de gran interés por su bajo costo, capacidad auto regenerativa y sostenibilidad (Huang et al., 2011).

Configuración y Diseño de las Celdas de Combustible Microbiano

La configuración de una CCM es parte fundamental, se pueden diseñar de diferentes formas, pero los principales diseños se clasifican en tres categorías (Condori & Torres, 2019).

- Cámara Única CCM
- Cámara Doble CCM
- Apilado CCM

Cámara única CCM

Du et al. (2012) mencionan que este diseño consta de un solo compartimiento que incluye el ánodo y el cátodo. El ánodo rectangular es acoplado con un cátodo de aire poroso que está expuesto directamente al aire por lo que no necesita ventilación artificial (Figura 4) (Farais, 2016). En la configuración de este tipo de CCM los electrodos están separados por una membrana intercambiadora de protones (MIP) que generalmente es prensada en caliente directo sobre el cátodo funcionando como electrodo-membrana y en el cátodo se transfiere los protones y electrones (Tharali et al., 2016).

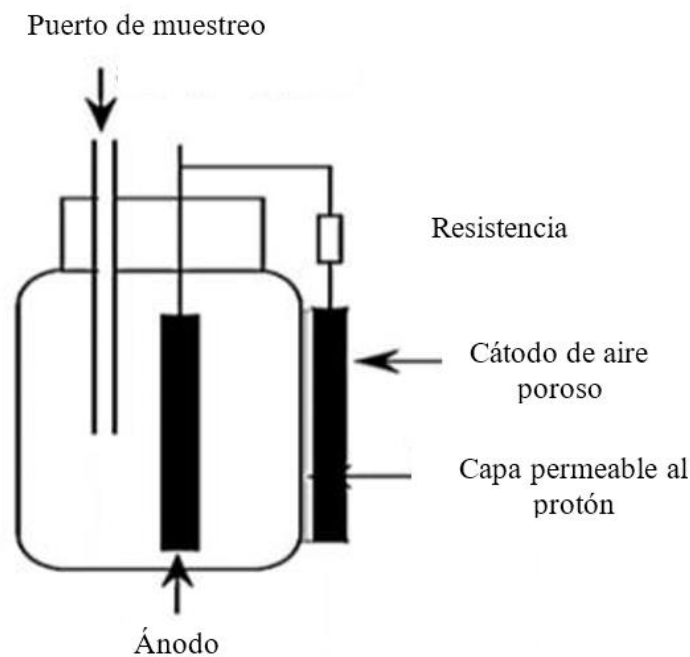


Figura 4. Celdas de Combustible Microbiano de cámara única (Park & Zeikus, 2013)

Las CCM de una cámara en su configuración algunas veces presentan MIP y en otras no presentan MIP; cuando no presenta MIP, la generación de energía eléctrica puede aumentar en magnitudes como la densidad de potencia (potencia por unidad de área W/m^2 o Watts por metro cuadrado) (Bermúdez & Bernal, 2018). Las celdas de cámara única tienen un bajo costo de operación ya que el cátodo no necesita aireación mecánica, pues el oxígeno presente en el aire actúa como aceptor final de electrones, sin embargo/como punto negativo esta es menos usada debido a su elevado costo y difícil ensamblaje (Ccora ,2019).

Cámara Doble CCM tipo H

El diseño de las CCM de doble cámara tipo H se lleva a cabo en dos compartimentos (ánodo y cátodo) conectadas a un tubo que contiene un separador de membrana de intercambio catiónico conocido también como Intercambio de protones (MIP), entre los cuales se tiene el puente salino, Nafion Ultrex o puente de sal (Figura 5) (Min et al., 2015). Debido a lo anteriormente citado, la utilización de este diseño, en la actualidad es empleado a escala laboratorio, porque es más económico que el de cámara única y cámara apilada (Min et al., 2015).

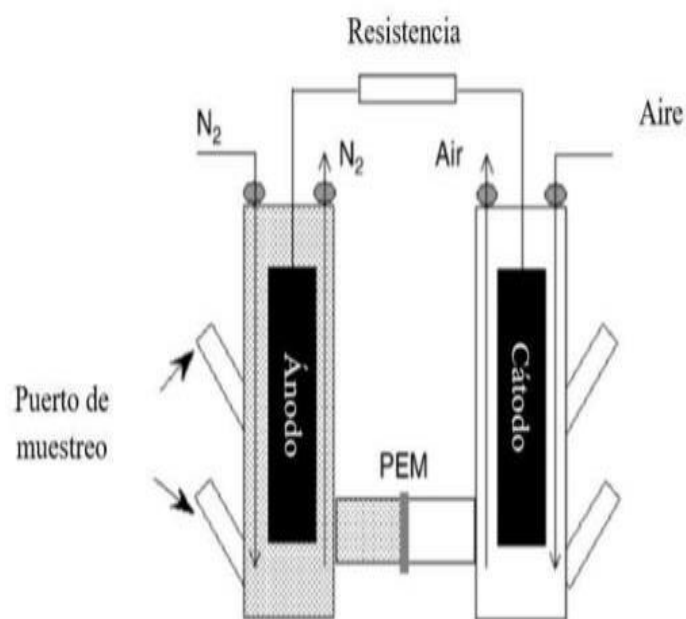


Figura 5. Celdas de Combustible Microbiano de doble cámara tipo H (Min et al., 2015)

Este tipo de celdas se fabrican en acrílico o vidrio, para la fabricación de los electrodos se pueden usar diversos materiales como el cobre, platino, grafito u otros, el separador que es una membrana es un componente importante en el sistema, porque impide el paso de electrones de la cámara anódica a la catódica y solo deja pasar a los protones, esta membrana puede ser de diferentes tipos: membrana de intercambio catiónico (MIC), membrana de intercambio de aniones, membrana bipolar, membrana de microfilmación, de ultrafiltración, puente salino, fibra de vidrio,

porosas u otros materiales (Zeng et al., 2014). El separador ampliamente usado es la MIC o también conocido como membrana de intercambio de protones (MIP) y entre ellas es común la de Nafion, que muestra una alta permeabilidad a los protones (Du et al., 2007).

CCM Apilada

Las CCM apilada son varias celdas conectadas en serie y en paralelo, con este diseño se pueden obtener mejores salidas de corriente eléctrica o voltaje, por ende la conexión de varias CCM en paralelo produce mayor eficiencia a diferencia de las conectadas en serie, las celdas en paralelo presentan una mayor corriente de cortocircuito; sin embargo, la conexión de varias celdas, sea paralela o en serie implica costos elevados, debido al uso varios electrolitos seguidos (Figura 6) (Bermúdez & Bernal, 2018)

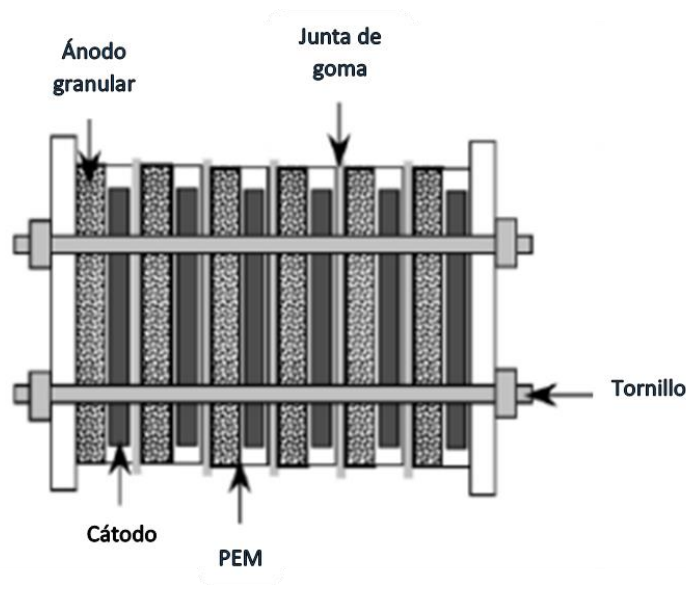


Figura 6. Celdas Apiladas (Bermúdez & Bernal, 2018)

La configuración de la CCM apilada es diferentes tanto a nivel de electrodo como de flujo hidráulico y pueden ser de cuatro tipos: Conexiones de electrodos en serie en modo de flujo paralelo, conexiones de electrodos en paralelo en modo de flujo en paralelo, conexiones de electrodos en serie en modo de flujo en serie y conexiones de electrodos en paralelo en flujo en serie (Tharali et al., 2016)

Los principios de la física indican que el mejor desempeño eléctrico es mediante la conexión de las celdas en paralelo, ya que la corriente en los circuitos en serie es la misma en todas las partes del circuito y que la resistencia, es la suma de las resistencias individuales de los componentes del circuito, mientras que; para los circuitos en paralelo, la corriente total es la suma de las corrientes individuales (Pineda & Rosas, 2016). Baltazar (2019) menciona que el aumento de tensión o

corriente de salida se puede lograr mediante celdas apiladas; sin embargo, estos sistemas pueden ser afectados de manera significativa por una o unas pocas unidades de bajo rendimiento, un fenómeno llamado inversión de voltaje.

Selección de la configuración de las CCM

Existe una gran diferencia entre las configuraciones de una y doble cámara, porque las dos no funcionan igual, las de cámara doble son mucho más eficientes a comparación de la otra en cuanto a densidad de potencia o densidad de corriente.

En la tabla 1 se muestra las características como las ventajas y desventajas de las CCM de doble cámara y cámara única.

Tabla 1. Comparaciones de características de las CCM de doble cámara y una sola cámara.

Doble Cámara tipo H	Una Sola Cámara
- Mas económica	- Menor costo de construcción
- No hay necesidad de una membrana de nafin para el intercambio protónico y se vuelve de menor costo	- Existe la necesidad de una membrana PEM
- Se puede elaborar de dos formas la continua y discontinua	- El cátodo es inseguro porque está expuesto de manera directa al aire.
- Se abstiene de la difusión de oxígeno a la cámara anódica.	- Sus diseños son complicados
- Los comportamientos adoptan distintas formas prácticas.	- No es necesario de una bomba de aireación
- Considerablemente usada en varias investigaciones a escala laboratorio.	- Estudiada en aplicaciones industriales
- Tiene varios diseños para que se lleve a cabo su respectivo funcionamiento.	- El diseño es de manera única
- Bajas temperaturas (4, 8 y 15 C) demuestra mejoras significativas en la eliminación de DQO.	- No es del todo anaeróbico debido a su destreza de electrodos
	- La máxima eliminación de DQO y densidad de potencia es a 35 °C

Fuente (Condori & Torres, 2019), (Elshobary et al., 2020)

La tabla 2 muestra los tipos de configuraciones usadas a escala laboratorio, se revisó alrededor de 10 artículos, para verificar cual configuración es la más eficiente para la producción de corriente eléctrica expresado en megavatio-hora.

Tabla 2 Tipos de Configuraciones de las CCM usadas a escala laboratorio.

Densidad de Potencia o Densidad de Corriente	Tipo de Celda	Diferencias de Diseño	Referencia
0.0135 mW/cm ²	Dos cámaras	Debido al lento crecimiento y adhesión de microorganismos	(Passos et al., 2016).
0.0073 mA/ Cm ²	Una cámara	La solución anódica del lodo primario debe ajustarse a un pH 7 para una alta generación de potencia	(Vologni et al., 2013).
0.0014 mW/cm ²	Dos cámaras	El aumento de distancia entre los electrodos (4, 8 y 12 cm)	(Buitrón & Pérez, 2011)
0.03661 mW/cm ²	Una cámara	CCM de cátodo ferroso como la CCM de cátodo aéreo.	(Luo & Zhang, 2010)
0.23 mA/cm ²	Dos cámaras	En este estudio, se construyeron dos tipos diferentes de CCM para estudiar la composición y distribución de la resistencia interna, se divide en resistencia anódica (R _a), resistencia catódica (R _c) y resistencia óhmica (R _Ω) según su origen y el diseño de los CCM, conjunto de electrodos de membrana disminuyó la resistencia óhmica (Ω) y facilitó el transporte de electrones a través del ánodo y los catódico.	(Liang & Wang, 2007)
0.0031 mW/cm ²	Dos cámaras	Se investigó la viabilidad de utilizar aguas residuales de la industria del chocolate como sustrato para la generación de electricidad utilizando lodos activados como fuente de microorganismos en una pila de combustible microbiana de dos cámaras, La reducción significativa de DQO, DBO, sólidos totales y sólidos totales disueltos de aguas residuales en un 75%, 65%, 68%, 50%, respectivamente, asimismo indicó un tratamiento eficaz de aguas residuales.	(Patil et al., 2009)
0.06 mA/cm ²	Dos cámaras	Demostó que la bacteria (Geobacter) es un reductor de metal oxidante que se detectaron principalmente en el electrodo, utilizado por las bacterias electroquímicamente activas (BEA) que utilizan el acetato (por ejemplo, Geobacter)	(Ha & Chang, 2008)
0.209 mW/m ²	Dos cámaras	La formación de biopelícula en el ánodo es más densa en la muestra de verano, que cuando se utilizó la muestra de invierno. Por lo tanto, las muestras tomadas durante el verano se consideraron mejores en la producción de electricidad y el tratamiento de aguas residuales que las tomadas durante el invierno, básicamente por la alta carga microbiana durante la temporada de calor. En paralelo, hubo una disminución en de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y demanda química de oxígeno (DQO) que alcanzaron valores de 71,8% y 72,85%, respectivamente.	(Gomaa et al., 2015)

7.7 mW/cm ²	Dos cámaras	Para una instalación de CCM de doble cámara, se utilizaron electrodos de hierro para la transferencia de electrones. El experimento demostró ser una prometedora fuente de energía alternativa para la solución de energía fuera de la red, durante la era Covid-19 y post-Covid-19.	(Nwaokocha et al., 2020)
62 mW/cm ²	Dos cámaras	En las pruebas de CCM, se hizo uso de un biocátodo aeróbico de alto rendimiento que aumentó el pico con una potencia de 9 veces mayor de 7 a 62 mW/cm ² en comparación con un cátodo de carbono no modificado, que era similar a la potencia máxima con un cátodo dopado con platino a 70 mW cm ² .	(Milner et al., 2016)
0.141 mA/cm ²	Una cámara	Este estudio indica con éxito la utilización de las aguas residuales domésticas y lácteas como potencial sustrato para la generación de energía sostenible, utilizando el alga <i>Shewanella</i> como biocatalizador en la pila de combustible microbiana.	(Choudhury et al., 2020)

Resultados

En la tabla 2 se indica estos dos tipos de dispositivos (cámaras CCM), para comparar cual resulta ser la más eficiente o apropiada de acuerdo a sus características, nosotras realizamos una comparación complementando a (Condori & Torres, 2019) de más estudios a escala laboratorio de los dos tipos de CCM en la tabla 2.

De acuerdo a la información de las tablas 1 y 2 se recomienda emplear las celdas de doble cámara tipo H, porque son las más utilizadas y económicas, al mismo tiempo estos dispositivos permiten tener mayor control sobre la cámara en condiciones anaeróbicas, además permite preparar la membrana intercambiadoras de protones, estas celdas con el fin de mejorar su diseño y ascender en cuanto a la generación de electricidad utilizando agua residual domestica como sustrato, obteniendo buenos resultados, se encuentra en constante investigación.

Conclusión

Las CCM es una de las tecnologías emergentes que pueden generar electricidad a partir de agua residual doméstica. Teniendo como catalizadores a microorganismos para generar electricidad, de los tres tipos de celdas, la más eficiente es la de cámara doble tipo H, porque son más usadas a escala de laboratorio, reduce la demanda química de oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Totales (SST) y Sólidos Totales Disueltos (STD), además, estos dispositivos permiten tener mayor control de la cámara, tiene varios diseños para su respectivo funcionamiento, las celdas de cámara única no son muy eficientes porque sus diseños son complejos y no modificables. Así mismo las celdas apiladas, debido a sus conexiones continuas de varias celdas, sea paralela o en serie, implica altos costos ya que emplea varios electrolitos seguidos.

Referencias

- Ali, A. E. H., Gomaa Ola, M., Fathey, R., El Kareem, H. A., & Zaid, M. A. (2015). Optimization of double chamber microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and electricity production. *Ranliao Huaxue Xuebao/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)
- Baltazar, E. (2019). Caracterización de un Sistema Híbrido conformado por un stack de celdas de combustible microbianas- paneles fotovoltaicos para la producción de electricidad a través del tratamiento de aguas residuales y radiación solar. 1–166.
- Bioimpedance and Bioelectricity Basics. (2013). *Bioimpedance and Bioelectricity Basics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-303260-7.x5000-x>
- Bermúdez, M., & Bernal, E. (2018). Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Bublitz, A., Keles, D., Zimmermann, F., Fraunholz, C., & Fichtner, W. (2019). A survey on electricity market design: Insights from theory and real-world implementations of capacity remuneration mechanisms. *Energy Economics*, 80, 1059–1078. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.01.030>
- Buitrón, G., & Jaime, P. y. (2011). Producción De Electricidad En Celdas De Combustible Microbianas Utilizando Agua Residual: Efecto De La Distancia Entre Electrodo. *TIP. Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 05–11. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2011.1.41>
- Ccora, b. (2019). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (mfc) en la ciudad de Huancavelica. Tesis, 1-150. Recuperado a partir de http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/unh/1378/tp_unh_inf_0101.pdf;sequence=1&isAllowed=y
- Condori, E., & Torres, G. (2019). Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica – Lima. In *Universidad Peruana Unión (Issue Ccm)*. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/165>

Corbella, C., & Puigagut, J. (2018). Improving domestic wastewater treatment efficiency with constructed wetland microbial fuel cells: Influence of anode material and external resistance. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1406–1414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.084>

China Electricity Council, 2016. Yearly Statistics of China Power Industry 2015

Choudhury, P., Ray, R. N., Bandyopadhyay, T. K., Basak, B., Muthuraj, M., & Bhunia, B. (2020). Process engineering for stable power recovery from dairy wastewater using microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.152>

De Sousa, G., Franco, D. C., De Aquino, S., & De Aquino, F. (2010). Characterization of contaminants present in sewage treatment plants, by liquid chromatography high resolution tandem mass spectrometry. *Química Nova*, 33(3), 734–738. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422010000300044>

Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. 1–21. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>

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

Elshobary, M. E., Zabed, H. M., Yun, J., Zhang, G., & Qi, X. (2020). Recent insights into microalgae-assisted microbial fuel cells for generating sustainable bioelectricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.251>

Enamala, M. K., Dixit, R., Tangellapally, A., Singh, M., Dinakarrao, S. M. P., Chavali, M., Pamanji, S. R., Ashokkumar, V., Kadier, A., & Chandrasekhar, K. (2020). Photosynthetic microorganisms (Algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: Concise review. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100959. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100959>

Epec. (2011). las energías renovables.

Farias, N. (2016). Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas bioelectroquímicas microbianas para la producción de energías alternas.

Franco, L., & Ricaute, S. (2018). Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del Campus Universitario Meléndez.

García, J., Bautista, M., Hernández, A., & Zumaya, R. (2017). Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana *Revista de Operaciones Tecnológicas*. *Revista de Operaciones Tecnológicas*, 1(3), 1–9.

Gadini, M. (2009). Reutilización del agua residual tratada en la cervecera del valle S.A. (Tesis de Pregrado). Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.

Gamio Aita, P. (2017). Energía: un cambio necesario en el Perú. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, (1), 93-135. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.201701.004>

Ha, P. T., Tae, B., & Chang, I. S. (2008). Performance and bacterial consortium of microbial fuel cell fed with formate. *Energy and Fuels*, 22(1), 164–168. <https://doi.org/10.1021/ef700294x>

Huang, L., Regan, J. M., & Quan, X. (2011). Electron transfer mechanisms, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(1), 316–323. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.096

Huamán, F. y, Gina, M., & Tito, M. (2020). Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

James, C., Hema Meenal, S., Elakkiya, S., & Logarshani, S. (2020). Sustainable environment through treatment of domestic sewage using MFC. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.110>

Liang, P., Huang, X., Fan, M. Z., Cao, X. X., & Wang, C. (2007). Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 77(3), 551–558. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1193-4>

Li, H., Wang, Z., Chen, L., & Huang, X. (2009). Research on Advanced Materials for Li-ion Batteries. *Advanced Materials*, 21(45), 4593–4607. doi:10.1002/adma.200901710

- Luo, Y., Liu, G., Zhang, R., & Zhang, C. (2010). Power generation from furfural using the microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 195(1), 190–194. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.057>
- Mayo, P. E. (2010). Proyecto Ejecutivo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para la Localidad de Xochiapa (Tesis de Pregrado). Universidad Veracruzana, Xalapa.
- Milner, E. M., Popescu, D., Curtis, T., Head, I. M., Scott, K., & Yu, E. H. (2016). Microbial fuel cells with highly active aerobic biocathodes. *Journal of Power Sources*, 324, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.05.055>
- Ma, X., & Fu, Q. (2020). The influence of financial development on energy consumption: Worldwide evidence. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041428>
- Min, B., Kim, J. R., Oh, S. E., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2015). Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Research*, 39(20), 4961–4968. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.039>
- Munoz-Cupa, C., Hu, Y., Xu, C., & Bassi, A. (2020). An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. *Science of the Total Environment*, 754, 142429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>
- Nacional, N. (2020). Enero - junio 2020. *Visión Gerencial*, 0(1), 1-174.
- Nacional, N. (2019). Principales Indicadores del sector eléctrico a nivel nacional- Julio 2019. 2019.
- National bureau of statistics of china. (2019). 1. <http://www.stats.gov.cn/english/pr>.
- Nwaokocha, C. N., Giwa, S. O., Layeni, A. T., Kuye, S. I., Samuel, O. D., Ogunbona, C. K., Adebayo, J. K., Sosanya, A., & Babalola, A. (2020). Microbial fuel cell: Bio-energy production from Nigerian corn starch wastewater using iron electrodes. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.345>
- Ñacato, D. (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 (Vol. 3, Issue 2). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>

- Ocola, S. J. (27 de Mayo de 2010). Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Riego
- OEFA. (2014), Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. Lima: Perú Cyclus Print Matt.
- Oblitas Perez, C. L. (2018). Universidad Nacional De Huancavelica Jurados. Tesis, 24, 25. Recuperado a partir de <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/1378/TP - UNH. ENF. 0101.pdf sequence=1&isAllowed=y>.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2013). Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnology and Bioengineering*, 81(3), 348-355. <https://doi.org/10.1002/bit.10501>
- Passos, V. F., Aquino Neto, S., de Andrade, A. R., & Reginatto, V. (2016). Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater treatment plant. *Scientia Agricola*, 73(5), 424–428. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0194>
- Patil, S. A., Surakasi, V. P., Koul, S., Ijmulwar, S., Vivek, A., Shouche, Y. S., & Kapadnis, B. P. (2009). Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. *Bioresource Technology*, 100(21), 5132–5139. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.041>
- Pineda, A., & Rosas, M. (2016). Estado del arte en las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) para producción de bioenergía (Issue Ccm).
- Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (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>
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745-756. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.031>

- Tharali, A., Sain, N., & Osborne, J. (2016). Microbial fuel cells in bioelectricity production. *Frontiers in Life Science*, 9(4), 252–266. <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1230787>
- Vologni, V., Kakarla, R., Angelidaki, I., & Min, B. (2013). Increased power generation from primary sludge by a submersible microbial fuel cell and optimum operational conditions. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 36(5), 635–642. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-0918-2>
- Valencia, M. (2018). Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales del Camal.