



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO EN LA APLICACIÓN DE
CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA
INDUSTRIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”

Trabajo de Investigación para optar el grado académico de:
Bachiller en Ingeniería Ambiental

Presentado por:

Edson Raúl Mamani Zevallos (0000-0002-4815-6640)

Asesor:

Fernando Javier Chávez Zegarra (0000-0002-2606-6556)

Lima – Perú

2019



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°136-2020-DACIA-DAFCA-U.CIENTÍFICA.

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Lima 26 de julio de 2020

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Análisis técnico-económico en la aplicación de celdas de combustible microbiana a escala industrial para el tratamiento de aguas residuales y producción de energía eléctrica**, presentado por:

- **Mamani Zevallos Edson Raúl**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

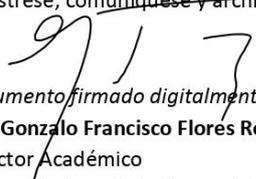
Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Análisis técnico-económico en la aplicación de celdas de combustible microbiana a escala industrial para el tratamiento de aguas residuales y producción de energía eléctrica** con N° de registro de la carrera: **057-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Fernando Javier Chávez Zegarra** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese.


Documento firmado digitalmente
Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico
Carrera de Ingeniería Ambiental

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO EN LA APLICACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA INDUSTRIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Edson Raúl Mamani Zevallos

edmaze12@gmail.com

RESUMEN

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos con la capacidad de degradar compuestos orgánicos y en este proceso generar energía eléctrica, así demuestran ser una de las tecnologías más destacables para mitigar la demanda de agua tratada y energía eléctrica, así contribuyendo en la protección de medio ambiente. Los principales beneficios económicos de la implementación de esta a gran escala son la disminución en costos de energía usada en el tratamiento de AR, además el valor agregado (energía eléctrica), también se destaca la significativa disminución de biomasa y lodos a diferencia de tratamientos aeróbicos, logrando también la disminución de costos en tratamientos y disposición de estos. No para llegar a su práctica a gran escala aún se deben superar dificultades, entre estas destacan es el costo de los materiales, los ánodos y cátodos los cuales representan un 70% del costo total de implementación de la CCM, para ser llevados a gran escala deben estar basados en materiales moderadamente baratos y con un alto rendimiento energético, entre estos se destacarían los nanotubos de carbono y las esponjas de grafeno, ya que debido a sus grandes superficies específicas, excelente estabilidad y conductividad se perfilan como los materiales idóneos para la escalabilidad. Por otro lado, si bien el aumento de las dimensiones de la CCM provoca una disminución de la densidad de potencia, la conexión en serie y en paralelo de varias CCM sería la forma más eficiente de generar grandes cantidades de densidad de potencia y buena opción en el escalamiento.

Palabras clave: celdas de combustible microbianas, ánodo, cátodo, aguas residuales.

ABSTRACT

Microbial fuel cells are devices with the ability to degrade organic compounds and in this process of generating electricity, so they will be one of the most outstanding technologies to mitigate the demand for treated water and electrical energy, thus contributing to the protection of environment. The main economic benefits of the implementation of this large scale are the decrease in energy costs used in the treatment of RA, in addition to the added value (electrical energy), the significant decrease in biomass and sludge is also highlighted, as opposed to aerobic treatments, also achieving the reduction of costs in treatments and their disposition. Not to reach its practice on a large scale, difficulties must still be overcome, among these are the cost of materials, anodes and cathodes which represent 70% of the total cost of CCM implementation, to be carried out on a large scale they must be included in moderately cheap materials and with high energy efficiency, among these are carbon nanotubes and graphene sponges, since due to their large specific surfaces, excellent stability and conductivity they are outlined as the ideal materials for scalability. On the other hand, although the increase in the dimensions of the CCM causes a decrease in the power density, the series and parallel connection of several CCMs would be the most efficient way of generating large amounts of power density and a good option in the escalation.

Keywords: microbial fuel cells, anode, cathode, wastewater

I. INTRODUCCIÓN

El vertimiento de aguas residuales (AR), sin previo tratamiento, generadas por diversos procesos y fuentes, como residuos domésticos, agrícolas e industriales, es la principal causa de impactos ambientales sobre los cuerpos de agua superficiales y subterráneas (Hernández-Fernández et al., 2015). Entre estas se destacan la eutrofización, la hipoxia y las floraciones de algas que afectan directamente las fuentes de agua potable (Nitorisravut & Regmi, 2017). Por otro lado, actualmente se cuenta con diversas tecnologías de tratamiento de AR, no obstante, estos son intensivos en el uso energía, insumos químicos y requieren grandes inversiones sin generar ingresos (Palanisamy et al., 2019). Aproximadamente en promedio los procesos de tratamiento de AR requieren una demanda energética de 0.5–2 kWh por m³ de AR tratadas solamente para la degradación de carbono y nitrógeno parcial (Gude, 2016).

En segundo lugar, las AR en particular actualmente se están siendo consideradas como un 'recurso fuera de lugar' de la cual se podría producir productos y energía eléctrica (Silva, Torres, & Madera, 2008). En este contexto, se ha estimado que las aguas residuales domésticas (ARD), contendrían hasta 7.6 kJ por litro o 23 W per cápita. (Pyo, Kim, Lee, & Yoo, 2014). Además, debido sus características de robustez y flexibilidad, los tratamientos biológicos anaeróbicos (ausencia de oxígeno), en otras palabras, la digestión anaeróbica (EA), (Escapa, Mateos, Martínez, & Blanes, 2016). En este tipo de tecnologías destacan las CCM, estos dispositivos que generarían energía eléctrica mediante la degradación de compuestos orgánicos presentes en las AR, así no solamente realiza un tratamiento de las AR sino que genera un valor agregado (Pandey et al., 2016),

Sin embargo, a pesar de que la innovadora tecnología de las CCM para mejorar la forma de tratar el AR y la producción de energía, se deben superar muchos desafíos si se quieren implementar a gran escala, esto debido a los elevados precios de los materiales de esta y

la reducida generación de energía (Sabeen, Noor, Ngadi, Almuraisy, & Raheem, 2018). No obstante, según su aplicación de los MFC a nivel de laboratorio, los investigadores han demostrado su idoneidad para la aplicación de este a escalas industriales, con estas posibilidades en mente, este estudio tiene como objetivo analizar las características tecnico-economicas ideales para la aplicación de las CCM a gran escala.

II. REVISIÓN TEÓRICA

2.1. AGUAS RESIDUALES (AR)

Son aquellas aguas cuyas características naturales fueron alteradas debido al uso del hombre e interacción con los residuos de este, representan un peligro a la salud humana y el ambiente, ya que contienen gran cantidad de sustancias y microorganismos contaminantes (Kaur, Marwah, Chhabra, Kim, & Tripathi, 2019).

2.1.1. CLASIFICACION DE AGUAS RESIDUALES

Debido al contenido de sustancias específicas, se clasifican en:

2.1.1.1. Aguas residuales domesticas (ARD)

Son las que se originan en los sectores residencial y comercial, las cuales se caracterizan por contener residuos orgánicos provenientes de la actividad humana, y necesariamente requieren tratamiento (Sabeen et al., 2018). Además, cabe resaltar que los constituyentes convencionales presentes en ARD son: sólidos suspendidos (sólidos totales), compuestos orgánicos, medidos mediante la demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (nitritos y nitratos), fósforo, y microorganismos (MO) (Yazdi, Alzate-Gaviria, & Ren, 2015). Además, según las características de los constituyentes estas se clasifican en:

2.1.1.2. Aguas negras

Son las que se generan de residuos fisiológicos (heces y orina humanas) y de sustancias que proceden de la cocina. Cabe resaltar que estos suelen contener elevadas cantidades de materia orgánica y MO (Gude, 2016).

2.1.1.3. Aguas grises

Las aguas grises son las generadas en prácticas de aseo y lavado, se producen por las duchas, lavaplatos, lavadoras y lavaderos, además, es importante señalar que estas representarían el mayor uso que se le da al agua en viviendas, entre 50 y 80% (Chouler & Di Lorenzo, 2015).

2.1.1.4. Características principales de las ARD

A. Físicas

Las características físicas más resaltantes de las ARD se representan en el siguiente cuadro:

Características	Parámetros	Unidad	Descripción con respecto a las aguas residuales
Físicas	Temperatura (°C)	10-21 (15°C prom)	Altas cantidades de temperatura genera un impacto negativo sobre las aguas receptoras, provocando un aumento de bacterias, algas, hongos, etc. Así produciendo una modificación de la flora y fauna existente en estas y el agotamiento del oxígeno disuelto
	Turbidez (NTU)	24 -357 (146 prom)	La turbidez afecta a la incidencia de la luz, impactando así en las algas.
	Color	Gris, pardo y negro	Es un indicador de la edad de las AR. El AR reciente suele tener un color gris; sin embargo, según la degradación de compuestos orgánicos el color tiende a cambiar a negro. Bajo estas condiciones, el AR es séptica
	Sólidos suspendidos	16 -494 (223 prom)	
	Sólidos sedimentables	0 - 21 (7 prom)	

Tabla N°1. Características físicas de ARD

Fuente: Do et al., 2018

B. Químicas

Entre una de las características más representativas está el de Biodegradabilidad, esta hace referencia a la capacidad de las sustancias orgánicas a ser degradadas por medio de microorganismos, los cuales necesitan estas como fuente de alimento y energía para su metabolismo y reproducción (Hernández-Fernández et al., 2015). Existe una aproximación cuantitativa de la biodegradabilidad de un efluente, la cual está en función de relación entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). En la cual, si DBO/DQO es menor de 0.2 es recomendable realizar un tratamiento fisicoquímico; si $DBO/DQO > 0.4$ es más eficiente realizar un tratamiento biológico y si $DBO/DQO > 0.65$, entonces los vertidos se consideran orgánicos y aptos (Nava-Diguero & Castillo-Juárez, 2018).

2.1.2. AR industriales

Son aquellas que se generan en un proceso productivo, en los cuales se destacan las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras (Lissarrague, 2015). La necesidad de implementar en los procesos productivos industriales ha provocado que grandes concentraciones de metales pesados con altos potenciales tóxicos sean emitidos a la atmósfera y vertidos cuerpos de agua superficiales y ambientes terrestres (Al Lawati, Jafary, Baawain, & Al-Mamun, 2019).

2.1.3. AR agrícolas y ganaderas

Son las que constituyen una mezcla entre aguas residuales domésticas, de riego de para tierras y para el ganado. Es importante señalar, que la búsqueda de un aumento en la productividad agrícola ha provocado el uso excesivo e indiscriminado de fertilizantes y plaguicidas químicos (Condori Pacheco & Torres Zamata, 2019). Sustancias que, si bien tienen un beneficio orgánico, pueden provocar grandes daños a la salud humana y ambiente debido a sus características toxicas (Yazdi et al., 2015) Así, los fertilizantes:

constituidos por nitratos, fosfatos y compuestos de amonio tienen gran potencial de contaminación de ríos, lagos y mares, alterando el equilibrio de las especies acuáticas, por otro lado los plaguicidas: como herbicidas, fungicidas y pesticidas producen un efecto tóxico sobre las especies, incluido el hombre (Karthikeyan, Selvam, Cheng, & Wong, 2016).

2.2. Contaminantes en aguas residuales

2.2.1. Contaminantes orgánicos

Estos pueden ser:

2.2.1.1. Residuos de Proteínas

Proceden principalmente de las heces humanas o desechos de alimentos, además se caracterizan por ser fácilmente degradables, inestables y generan un olor putrefacto, desagradable para el ser humano (Condori Pacheco & Torres Zamata, 2019).

2.2.1.2. Residuos de Carbohidratos

Proviene de los residuos alimenticios y de las excretas humanas, en su mayoría estos son azúcares, almidón y fibras celulósicas (Condori Pacheco & Torres Zamata, 2019).

2.2.1.3. Residuos de Aceites y Grasas

Son aquellos que proceden de las acciones generadas en la cocina, de naturaleza lipídica, los cuales son estables, no se mezcla con el agua debido a su mínima densidad, estimulando la aparición de ácidos grasos, saturados e insaturados y otros en la superficie de las aguas residuales (Kaur et al., 2019).

2.2.2. Contaminantes inorgánicos

Los contaminantes inorgánicos tienen origen en los minerales, dichos sales, ácidos, óxidos y metales, los cuales se liberan al ambiente y encuentra en en grandes concentraciones en las aguas residuales procedentes de diversos procesos productivos e industriales en los cuales se emplean estos (Kaur et al., 2019).

2.2.3. Contaminantes químicos y biológicos

Por un lado, los contaminantes químicos son compuestos que se originan de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Kumar, Sarathi, & Nahm, 2013). Por otro lado, se considera contaminantes biológicos a aquellos MO patógenos presentes en el agua (bacterias, virus, protozoos y algas), procedentes de AR con potencial para provocar enfermedades.

III. Normativa

Para el desarrollo de este proyecto se tiene en cuenta la siguiente normatividad.

- “Ley N° 28611 (Ley General del Ambiente). (15/10/2005)”: “Artículo 5°
- “Ley 29338- Reglamento de ley de Recursos Hídricos”: “Artículo 131°.
- “Decreto Supremo 004-2017-MINAM: Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua”.
- Decreto supremo 003-2010-MINAM: Aprueban el Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Domésticas o Municipales”.

IV. Energía usada en el tratamiento de aguas residuales domesticas (ARD)

4.1. Energía usada según la tecnología de tratamiento

Basándonos en la energía empleada para el tratamiento de ARD de la una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), una tecnología comúnmente usada es el

tratamiento anaeróbico de lodos activados (LA) y digestión anaerobia de lodos la cual consume un aproximado de 0.6 kWh de energía por m³ de aguas residuales tratadas (Logan et al., 2015). Además, es importante señalar que aproximadamente el 50% de la energía eléctrica es empleada suministrar aire para las cuencas de aireación (Włodarczyk & Włodarczyk, 2017).

Por otro lado, tratamiento de ARD mediante lagunas, filtros de goteo, y tratamientos avanzados de AR exige 0.09 e 0.29, 0.18 e 0.42, 0.33 e 0.40 kWh / m³ respectivamente (Rossi, Wang, Yang, & Logan, 2019). No obstante, es importante señalar que este proceso el biogás (CH₄) generado en el proceso de digestión anaerobia podría satisfacer entre 25 a 50% de la energía requerida para el tratamiento aeróbico de lodos activados y otros. Sin embargo, si pudiera obtener un potencial energético de las AR, entonces, el tratamiento de ARD podría en lugar de ser un consumidor de energía, convertirse en un productor neto (Stager, Zhang, & Logan, 2017).

4.2. Energía usada según la capacidad

Las modificaciones en la capacidad de la PTAR pueden reducir aún más las necesidades de energía considerablemente, cabe resaltar, que la demanda de energía para los procesos de eliminación de carbono es menor que los que eliminan nitrógeno (Gude, 2016). Se llego a identificar que el consumo de energía tiende a disminuir a medida que el tratamiento aumenta la capacidad (Fig.1 A). Es decir, los requerimientos de energía disminuyen con el tamaño de la PTAR, y la tendencia sigue siendo igual para rangos bajos, medios y altos de energía (Fig.1 B)

Analizando la variación en demandas de energía esta es grande y prácticamente se debe y es impulsada por otros factores, incluido el tipo de filtración y la fuente calidad del agua. Además, las instalaciones que realizan el tratamiento con filtración a presión y

oxidación tienen menores índices de consumo de energía, mientras que las instalaciones que utilizan directamente la filtración de arena presentan mayores (Gude, 2016).

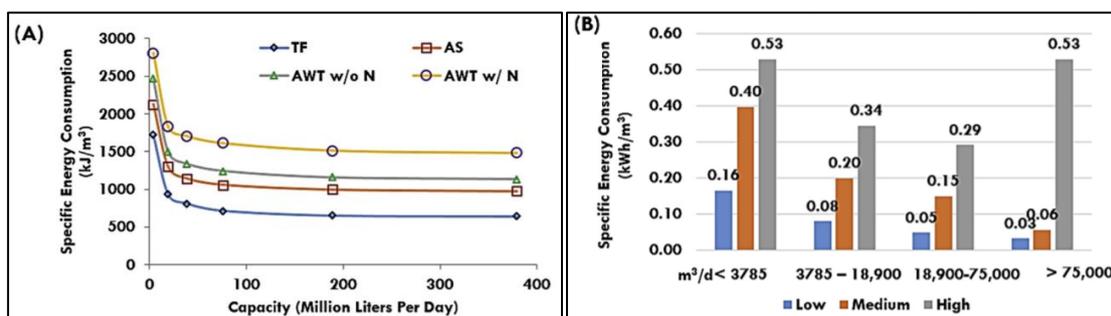


Figura 1. (A) Energía requerida para la eliminación de carbono y nitrógeno en el lodo activado (AS); filtros de goteo (TF); Tratamiento avanzado de aguas residuales sin eliminación de nitrógeno (AWT w / o N) y tratamiento avanzado de aguas residuales con eliminación de nitrógeno (AWT w / N); (B) Valores bajos, medianos y altos para el consumo de energía a diferentes capacidades de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: Gude, 2016

V. Celdas de combustible microbiano (CCM)

5.1. Metodología de operación de la CCM

Las CCM son dispositivos que utilizan bacterias como catalizadores para oxidar los sustratos orgánicos presentes en AR, y en este proceso generan corriente eléctrica, esto es posible debido a los microorganismos presentes en esta transfieren los electrones producidos en sus procesos metabólicos a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones como el oxígeno (Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013). Este proceso permite la degradación de la materia orgánica, la cual funcionaria como sustrato o combustible (Park et al., 2017). Cabe resaltar que una CCM regularmente se compone de dos espacios (cámaras) (Fig 2), una bajo condiciones anaeróbica y otra en condición aeróbica en medio de las cuales se encuentra la membrana de intercambio catiónico, la cual tiene la función de permitir solo el paso hidrogeniones de la cámara anódica a la catódica (Choudhury et al., 2017). Además, en la cámara anaeróbica se encuentran los

sustratos orgánicos que, al oxidarse por acción de los MO, generan electrones y protones.

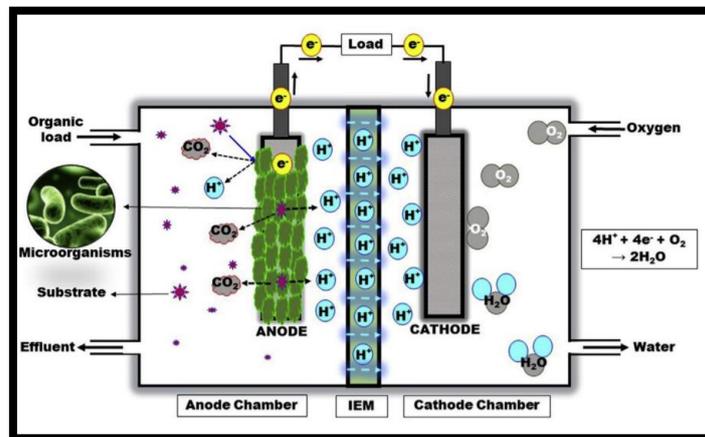


Figura 2. Metodología de operación de la CMM

5.2. Configuración de una CCM

Las CCM se construyen en función a una variedad de requisitos arquitectónicos (diseño), y de materiales (Nava-Diguero & Castillo-Juárez, 2018). Además, generalmente se evalúan en función a la potencia de salida, la eficiencia Coulombica, la estabilidad y el tiempo de vida útil (Choudhury et al., 2017). Así, la CCM, se puede optimizar en función de dos tipos de compartimentos de las cámaras como se detallará próximamente:

5.2.1. CCM de dos cámaras

Un diseño ampliamente económico, estudiado y utilizado es el de la CCM de dos cámaras, este es construido en forma de "H", que por lo general consta de dos compartimentos conectados por medio de un tubo que contiene en medio la membrana de intercambio catiónico (MIC) esta puede ser tanto Nafion o Ultrex o un puente de sal simple, para permitir que los protones se muevan hacia el cátodo mientras bloquea la difusión de oxígeno hacia el ánodo (Logan et al., 2015). Además, dichos compartimentos pueden

funcionar en varias formas prácticas, como cilíndricas, rectangulares y en miniatura (Condori Pacheco & Torres Zamata, 2019).

5.2.2. CCM de una cámara

En este diseño, el ánodo y el cátodo no se encuentran en compartimentos diferentes, sino que ambos comparten un compartimento anódico simple, en el cual el compartimento catódico no está definido y es posible que no se haga empleo de MIP (Revelo et al., 2013). Además, el cátodo generalmente poroso que se ubica en un lado de la pared de la cámara y utiliza oxígeno de la atmósfera, que le permite que los protones se transfieran a través de ellos (Pandey et al., 2016). Las CCM de compartimento único ofrecen diseños más simples y son más baratos.

5.3. Diseño y materiales de CCM

El éxito de los futuros diseños de CCM dependerá en gran medida de la selección de materiales adecuados capaces de adaptarse a los requisitos particulares de los elementos activos (es decir, ánodo, cátodo y membrana) y trabajar dentro de las condiciones ambientales específicas del reactor (Kaur et al., 2019).

5.3.1. Materiales anódicos

En el ánodo se produce la oxidación de la materia orgánica presente en la AR, generando así el bombeo de electrones desde los MO hasta este (Palanisamy et al., 2019). Una de las características de ánodos eficientes es que estos deben ser altamente conductores, no corrosivos, deben tener gran superficie específica (área por volumen), alta porosidad, bajo costo, fácil de fabricar y debe ser escalable a tamaños mayores (Kim, Yang, Ye, LaBarge, & Logan, 2016).

5.3.1.1. Materiales a base de carbono como ánodo.

Entre los materiales de carbono se encuentran el fieltro de carbono, varillas de carbono, fibra de carbono y escobillas de carbón. Actualmente, se ha utilizado eficazmente como ánodos de carbono en CMM, debido a que se produce mayores densidades de potencia, 2437 y 2110 ± 68 mW / m² (90% de eliminación de DQO) de fieltro de carbono y escobillas de carbón, respectivamente, además también por su bajo costo (Palanisamy et al., 2019).

5.3.1.2. Ánodo con materiales a base de metal.

Ánodos fabricados de metales, por ejemplo; plata, acero inoxidable, aluminio, níquel, molibdeno, titanio, el oro y el cobre se caracterizan por ser eficientes transportados de electrones en CCM, esto debido a su alta CE. Además, ánodos a base de metal también presentan una alta resistencia a la corrosión y moderado costo efectividad (Palanisamy et al., 2019).

5.3.2. Materiales en Cátodos

En el cátodo se genera la reacción de reducción del O₂, los cátodos actúan como los aceptores de electrones en la CCM debido a su alto potencial de oxidación, estos son parte fundamental de la CCM debido a su disponibilidad, bajo coste, la sostenibilidad y la no formación de productos contaminantes, ya que el producto final formado es agua (Khan et al., 2017). En general, los electrodos basados en platino (Pt) son predominantemente utilizado como materiales de cátodos, debido a que poseen mayor estabilidad y excelente actividad catalítica. Sin embargo, estos electrodos poseen desventajas destacables como su alto costo, propensión a la contaminación biológica y al envenenamiento de la superficie de MO. Por lo que los materiales que cumplirían con la mayoría de requisitos serían estructuras de carbono, complejos metálicos, óxidos metálicos, con-polímeros de conductos, carbono dopado en N y otros (Do et al., 2018).

5.3.3. Membrana de intercambio de protones (MIP)

Las MIP, comúnmente usadas en CCM son ultrafiltración, puente salino y nafion, dichos componentes impiden el paso de cualquier elemento que no sean protones, desde la cámara anódica a la cámara catódica, así permitiendo la reacción del oxígeno molecular, los electrones procedentes del ánodo y protones para la formación de agua y así se cierre el circuito (Do et al., 2018).

5.4. Microorganismos dentro de la celda de combustible microbiana

Estos se pueden dividir en:

5.4.1. Microorganismos en la cámara anódica

Como inóculo para las CCM se pueden emplear cultivos de una especie microbiana en específica o cultivos mixtos (consorcios), estudios muestran que este segundo tiende a generar mayor potencial eléctrico (Rahmanian et al., 2015). A nivel práctico y como vista a una escala más amplia, es mejor emplear consorcios microbianos (CM), ya que estos generan altos potenciales y su manejo es más económico y eficiente, entre estos están los lodos anaeróbicos (Revelo et al., 2013). En los CM las bacterias comúnmente pertenecen a los géneros *Shewanella*, *Geobacter*, *Proteobacter* y *Pseudomonas*, se destacan las especies *S. putrefaciens*, *P. aeruginosa*, *G. sulfurreducens* y *G. metallireducens* (Silva et al., 2008).

5.4.2. Microorganismos en la cámara catódica

Entre los microorganismos electrótrofos que presentan una mayor eficiencia a aceptar electrones de la superficie del cátodo de manera directa o mediada (Revelo et al., 2013). Destacan las especies como *G. sulfurreducens* y *S. putrefaciens*, cabe resaltar que en la mayoría de los casos de las bacterias en biocátodos son Gram-negativas, pero algunas Gram-positivas, tales como *Micrococcus luteus*, *Bacillus subtilis* y *Staphylococcus*

carneus, también presentan una transferencia directa de electrones (Rahmanian et al., 2015).

VI. CMM en la producción de energía eléctrica y tratamiento de AR.

Contaminantes en las aguas residuales, en su mayoría sustancias orgánicas se pueden usar para producir productos limpios y electricidad directa mediante la degradación de estos. En otras palabras, la producción de electricidad en CCM es el resultado de reacciones de oxidación y reducción que resultan en liberación de electrones, transferencia y aceptación por bioquímica o electroquímica reacciones en los electrodos en las cámaras de ánodo y cátodo (Gude, 2016).

Las siguientes reacciones de oxidación y reducción se pueden representar los las siguientes ecuaciones:

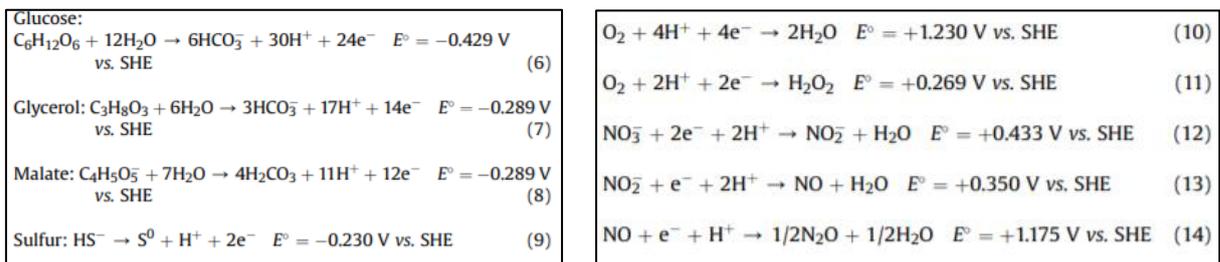


Fig 3. Reacciones de oxidación en la cámara anódica (6-9), reacciones de reducción en la cámara catódica (10-14)

Fuente: Gude, 2016

VII. Enfoque técnico-económico para la aplicación de CMM a escala industrial

7.1. Análisis económico

Uno de los principales atractivos del uso de las CCM para el tratamiento de ARD, es la disminución de costos en el uso energía que aportarían en comparación con los tratamientos convencionales (Escapa et al., 2016). Estos ahorros de energía en términos monetarios y estimaron que el valor de la energía generada por una CCM alimentada de

CCM podría ser tan alto como \$ 0.19 por kg de COD si el precio del hidrógeno se mantuviera relativamente alto (\$ 6 kg⁻¹) (Mehraanfar, Mahdavi, & Gheshlaghi, 2019).

En el estudio; Análisis de impacto de los MFC, se consideró una potencia capacidad de producción de electricidad de 1000 mW / m², lo que propuso una economía rudimentaria para un tratamiento de AR basado en CCM, para una ciudad con 100,000 habitantes que generan aproximadamente 16.4 mil millones de litros de AR durante un año, se identificó un potencial para producir 2,3 MW de energía eléctrica (Gude, 2016).

Por otro lado, la distribución de costos para la implementación de una CCM muestra que los materiales del ánodo y el cátodo son las que generan mayores costos representando aproximadamente un 70 % del costo total de la CMM, seguida por el colector actuariales y otras partes esenciales (Logan et al., 2015). Un análisis futuro presenta un diferente escenario de distribución de costos en que el material del ánodo y el cátodo los costos se han reducido significativamente, lo que hace que la corriente material de colección para ser los principales contribuyentes para la capital de MFC costos, para que esto suceda, los materiales de electrodos baratos deben ser considerado para mejorar el rendimiento energético y económico objetivos de los MFC (Escapa et al., 2016).

Otra ventaja económicamente destacable es que las CCM es que producen cantidades bajas de lodos y biomasa a diferencia de tratamientos aeróbicos, este es un punto de gran importancia, ya que la disposición final de los lodos en las PTARs genera grandes costos (Escapa et al., 2016). Un sim-análisis simplificado que consideró ambos, el balance energético en la CCM y la energía necesaria para el tratamiento de lodos, dio lugar a la conclusión de que el uso de la tecnología CCM como tratamiento de compuestos orgánicos es más eficiente energética y económicamente, dado que, el uso de energía para el tratamiento orgánico puede representar hasta 50% de los costos operativos, este ahorro puede representar una señal reducción significativa en la factura de energía (Gude, 2016).

7.2. Análisis técnico

Para lograr un mayor volumen de tratamiento de AR las CCM deben ser escaladas teniendo en consideración dos características fundamentales: aumentar las dimensiones del reactor o generar una conexión múltiple de reactores (Nava-Diguero & Castillo-Juárez, 2018). No obstante, varios estudios afirman que la densidad de potencia disminuye al aumentar las dimensiones de la CCM, esto debido a la resistencia eléctrica volumétrica y al volumen del reactor inactivo (Stager et al., 2017). Por lo que, ante esta problemática se recomienda técnicamente realizar la modularización, la cual se refiere a la conexión de varios módulos (CCM) en serie y en paralelo, así incrementado la eficiencia para generar grandes cantidades de densidad de potencia y siendo una buena opción en el escalamiento (Escapa et al., 2016).

Además, se deben tener en cuenta los siguientes mecanismos para mejorar la eficiencia de generación de energía y tratamiento de AR, con el fin de la implementación a gran escala.

7.2.1. Análisis técnico de ánodos y cátodos

El rendimiento de MFC y la viabilidad económica son principalmente asociados con desarrollos en materiales de electrodos de ánodo y cátodo.

7.2.1.1. Ánodos

Actualmente se vienen desarrollando nuevos materiales anódicos en CCM para mejorar su viabilidad económica y rendimiento, de estos estudios se destaca que los materiales carbonosos muestran una buena biocompatibilidad (con MO), estabilidad química y conductividad, además tienden a tener un costo bajo, por lo que se convierten en los

materiales más utilizados para los ánodos de las CCM a gran escala. No obstante, aun así su conductividad sigue siendo no lo bastante alta en comparación con los metales, aunque cabe resaltar que haciendo empleo colectores de corriente metálicos, se logra compensar esta debilidad (Hernández-Fernández et al., 2015).

Por otro lado, los materiales sin base de carbono, tales como como el titanio y el acero inoxidable también se probaron como ánodos CCM pero aunque su CE es mayor al de los materiales a base de carbono, teniendo en cuenta su rendimiento es pobre, esto debido a su área de superficie mucho menor y propiedades de superficie, las cuales no son óptimas para la formación de biopelículas sobre estas (Do et al., 2018), por lo que, todos estos factores limitan la posibilidades de que se utilicen con éxito en reactores a gran escala (Palanisamy et al., 2019). Por otro lado, también se investigaron materiales los cuales podrían ser idóneos para la escalabilidad, los cuales son:

A. Nanotubos de carbono

Son una de las alternativas para lograr la fabricación de ánodos a gran escala, constan de nanoestructuras huecas con paredes, que consisten de láminas de carbono con un espesor igual al de un átomo las cuales presentan extraordinarias características eléctricas y propiedades mecánicas (Escapa et al., 2016). Entre sus principales características, se destaca que tienen grandes superficies específicas, excelente estabilidad y conductividad (Choudhury et al., 2017).

B. Grafeno

Es otra alternativa de material a base de carbono para lograr la estabilidad es el de la esponja de grafeno (EG) y un acero inoxidable (Colector de corriente), que posee buenas propiedades eléctricas, Además, otra característica importante es la fabricación de este es fácil y relativamente barato (EG de 2 mm de espesor cuesta \$ 4 por 1 m²), por lo que

hace que desarrollo prometedor con potencial para aplicaciones a gran escala (Escapa et al., 2016).

7.2.1.2. Cátodos

La mayoría de los materiales a base de carbono utilizados para los ánodos también son adecuado como materiales de cátodo, aunque generalmente los metales nobles (por ejemplo, platino, paladio) poseen mayor estabilidad y excelente actividad catalítica (Do et al., 2018). No obstante, estos metales son muy caros para implantarlos a grandes escalas, y puede no ser económicamente justificable para usarlos en actividades de bajo valor agregado y baja productividad como para el tratamiento de AR (Kaur et al., 2019). Por otro lado, materiales a base de níquel, materiales a base de MoS₂, inoxidable aleaciones de acero y otras aleaciones de metales de transición, han demostrado ser alternativas adecuadas a los cátodos basados en Pt, ya que poseen características idóneas para su implantación a gran escala, entre estos, son fáciles de sincronizar, baratas, estables y con bajo potencial de exceso, las cuales serían idóneas debido a sus extraordinarias características eléctricas y propiedades mecánicas (Gude, 2016).

VIII. Conclusiones

En conclusión, las CMM demuestran ser una de las tecnologías más destacables para mitigar la demanda de agua tratada y energía eléctrica, así contribuyendo en la protección de medio ambiente. Los principales beneficios económicos de la implementación de esta a gran escala son la disminución en costos de energía usada en el tratamiento de AR, además el valor agregado (energía eléctrica) el cual podría ser empleado en el mismo proceso de tratamiento, reduciendo aun mas los costos, también se destaca la significativa disminución de biomasa y lodos a diferencia de tratamientos aeróbicos, logrando también 19 la disminución de costos en tratamientos y disposición de estos. No obstante, aunque

estas funcionan eficiente mente a nivel laboratorio y se ha logrado un aumento de densidades de potencia en los últimos años. Aun se necesita promover estudios que implementen este sistema a gran escala, en el presente estudio se determinó que una de las principales dificultades para poner en práctica es el costo de los materiales, destacando los ánodos y cátodos los cuales representan un 70% del costo total de implementación de la CMM, para ser llevados a gran escala deben estar basados en materiales moderadamente baratos y con un alto rendimiento energético, entre estos se destacarían los nanotubos de carbono y las esponjas de grafeno, ya que debido a sus grandes superficies específicas, excelente estabilidad y conductividad se perfilan como los materiales idóneos para la escalabilidad. Por otro lado, si bien al aumentar las dimensiones de la CCM, la densidad de potencia disminuye, la conexión en serie y en paralelo de varias CMM sería la forma más eficiente de generar grandes cantidades de densidad de potencia y buena opción en el escalamiento.

XIX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Lawati, M. J., Jafary, T., Baawain, M. S., & Al-Mamun, A. (2019). A mini review on biofouling on air cathode of single chamber microbial fuel cell; prevention and mitigation strategies. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101370>
- Choudhury, P., Uday, U. S. P., Mahata, N., Nath Tiwari, O., Narayan Ray, R., Kanti Bandyopadhyay, T., & Bhunia, B. (2017). Performance improvement of microbial fuel cells for waste water treatment along with value addition: A review on past achievements and recent perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(May), 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.098>
- Chouler, J., & Di Lorenzo, M. (2015). Water quality monitoring in developing countries;

Can microbial fuel cells be the answer? *Biosensors*, 5(3), 450–470.
<https://doi.org/10.3390/bios5030450>

Condori Pacheco, A. E., & Torres Zamata, G. (2019). Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica – Lima. Retrieved from <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1655>

Do, M. H., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Chang, S. W., Nguyen, D. D., ... Ni, B. J. (2018). Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *Science of the Total Environment*, 639, 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136>

Escapa, A., Mateos, R., Martínez, E. J., & Blanes, J. (2016). Microbial electrolysis cells: An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. from laboratory to pilot plant and beyond. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 942–956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.029>

Gude, V. G. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells - An overview. *Journal of Cleaner Production*, 122, 287–307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.022>

Hernández-Fernández, F. J., Pérez De Los Ríos, A., Salar-García, M. J., Ortiz-Martínez, V. M., Lozano-Blanco, L. J., Godínez, C., ... Quesada-Medina, J. (2015). Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Processing Technology*, 138, 284–297. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.022>

Karthikeyan, R., Selvam, A., Cheng, K. Y., & Wong, J. W. C. (2016). Influence of ionic conductivity in bioelectricity production from saline domestic sewage sludge in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 200, 845–852.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.101>

Kaur, R., Marwah, A., Chhabra, V. A., Kim, K., & Tripathi, S. K. (2019). Recent developments on functional nanomaterial-based electrodes for microbial fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (October), 109551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109551>

Khan, M. Z., Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Sultana, S., Ismail, I. M., & Shahzad, K. (2017). Microbial electrolysis cells for hydrogen production and urban wastewater treatment: A case study of Saudi Arabia. *Applied Energy*, 185, 410–420. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.005>

Kim, K. Y., Yang, W., Ye, Y., LaBarge, N., & Logan, B. E. (2016). Performance of anaerobic fluidized membrane bioreactors using effluents of microbial fuel cells treating domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 208, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.067>

Kumar, G. G., Sarathi, V. G. S., & Nahm, K. S. (2013). Recent advances and challenges in the anode architecture and their modifications for the applications of microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 43(1), 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.12.048>

Lissarrague, J. R. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Revista de La Facultad de Ingeniería de La USIL*, 2(1991), 9–25.

Logan, B. E., Wallack, M. J., Kim, K. Y., He, W., Feng, Y., & Saikaly, P. E. (2015). Assessment of Microbial Fuel Cell Configurations and Power Densities. *Environmental Science and Technology Letters*, 2(8), 206–214. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00180>

- Mehravanfar, H., Mahdavi, M. A., & Gheshlaghi, R. (2019). Economic optimization of stacked microbial fuel cells to maximize power generation and treatment of wastewater with minimal operating costs. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(36), 20355–20367. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.010>
- Nava-Diguero, P., & Castillo-Juárez, M. (2018). Revista de Ingeniería Innovativa Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad : Agua , energía y contaminación Microbial fuel cells as an alternative to solve the challenges of sustainability : Water , ene. *Revista de Ingeniería Innovativa*, *2*(5), 18–34.
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*(September 2016), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., & Roh, S. H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*, *221*, 598–621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172>
- Pandey, P., Shinde, V. N., Deopurkar, R. L., Kale, S. P., Patil, S. A., & Pant, D. (2016). Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*, *168*, 706–723. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.056>
- Park, Y., Park, S., Nguyen, V. K., Yu, J., Torres, C. I., Rittmann, B. E., & Lee, T. (2017). Complete nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in flat-panel air-cathode microbial fuel cells treating domestic wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *316*, 673–679. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.005>

- Pyo, S., Kim, M., Lee, S., & Yoo, C. (2014). Evaluation of environmental and economic impacts of advanced wastewater treatment plants with life cycle assessment. *Korean Chemical Engineering Research*, 52(4), 503–515. <https://doi.org/10.9713/kcer.2014.52.4.503>
- Rahmanian, N., Ali, S. H. B., Homayoonfard, M., Ali, N. J., Rehan, M., Sadeq, Y., & Nizami, A. S. (2015). Analysis of physiochemical parameters to evaluate the drinking water quality in the state of perak, Malaysia. *Journal of Chemistry*, 2015(Cd). <https://doi.org/10.1155/2015/716125>
- 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>
- Rossi, R., Wang, X., Yang, W., & Logan, B. E. (2019). Impact of cleaning procedures on restoring cathode performance for microbial fuel cells treating domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 290(May), 121759. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121759>
- Sabeen, A. H., Noor, Z. Z., Ngadi, N., Almuraisy, S., & Raheem, A. B. (2018). Quantification of environmental impacts of domestic wastewater treatment using life cycle assessment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 190, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.053>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Domestic wastewater reuse in agriculture. A review. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347–359.
- Stager, J. L., Zhang, X., & Logan, B. E. (2017). Addition of acetate improves stability of power generation using microbial fuel cells treating domestic wastewater.

Bioelectrochemistry, 118, 154–160.

<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.08.002>

Włodarczyk, B., & Włodarczyk, P. P. (2017). Microbial fuel cell with Cu-B cathode powering with wastewater from yeast production. *Journal of Ecological Engineering*, 18(4), 224–230. <https://doi.org/10.12911/22998993/74287>

Yazdi, H., Alzate-Gaviria, L., & Ren, Z. J. (2015). Pluggable microbial fuel cell stacks for septic wastewater treatment and electricity production. *Bioresource Technology*, 180, 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.100>