NOVA REVISTA

DESEMPEÑO ELÉCTRICO Y DISMINUCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA DE UNA MEZCLA DE LODO Y AGUA RESIDUAL SINTÉTICA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

ELECTRICAL PERFORMANCE AND ORGANIC LOAD REDUCTION OF A SYNTHETIC SLUDGE-WASTEWATER MIXTURE FROM A MICROBIAL FUEL CELL

[1] Beatriz Elizabeth Arteaga Benavides
[2] José Sebastián Zambrano Chipud
[3] María Nathalia Vallejo Basante
[4] Sofía Oquendo Coral

Recibido: julio 31, 2020.
Aceptado: diciembre 14, 2020.

1 Centro Sur Colombiano de Logística Internacional, SENA, Nariño, Colombia.
Email: bearteagab@gmail.com
2 Centro Sur Colombiano de Logística Internacional, SENA, Nariño, Colombia.
Email: sebastian1087426@gmail.com
3 Sur Colombiano de Logística Internacional, SENA, Nariño, Colombia.
Email: mv2002709@gmail.com
4 Centro Sur Colombiano de Logística Internacional, SENA, Nariño, Colombia.
Email: sofiaoquendo693@gmail.com

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño eléctrico y la disminución de carga orgánica de una Celda de Combustible Microbiana (CCM), utilizando agua residual sintética y lodos anaerobios procedentes de una zona de Túquerres, Nariño. La metodología consistió en determinar el desempeño eléctrico a partir de la densidad de potencia y la eficiencia coulómbica, la disminución de la carga orgánica se determinó con la **demanda química de oxígeno** a partir de una estimación y modelación matemática. Los resultados de esta investigación generaron una corriente eléctrica a pequeña escala con una densidad de potencia de 875 nW/m2 y una remoción de materia orgánica del 97,3%. En conclusión, las CCM es un sistema atractivo para la generación de electricidad y la remoción de materia orgánica que, junto con la simulación matemática, ayudaría a predecir y calibrar estos modelos para su uso en futuras aplicaciones industriales.

Palabras clave: celda de combustible microbiana, generación eléctrica, materia orgánica, eficiencia coulómbica.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the electrical performance and the organic load reduction of a Microbial Fuel Cell (MFC), using synthetic wastewater and anaerobic sludge from an area of Túquerres, Nariño. The methodology consisted of determining the electrical performance from the power density and the coulombic efficiency, the decrease of the organic load was determined with the chemical oxygen demand from an estimation and mathematical modeling.

The results of this research generated a small-scale electric current with a power density of 875 nW/m2 and an organic matter removal of 97.3%. In conclusion, MCC is an attractive system for electricity generation and organic matter removal that, together with mathematical simulation, would help to predict and calibrate these models for use in future industrial applications.

w.DeepL.com/Translator (free version)

Keywords: microbial fuel cell, electricity generation, organic matter, coulombic efficiency.

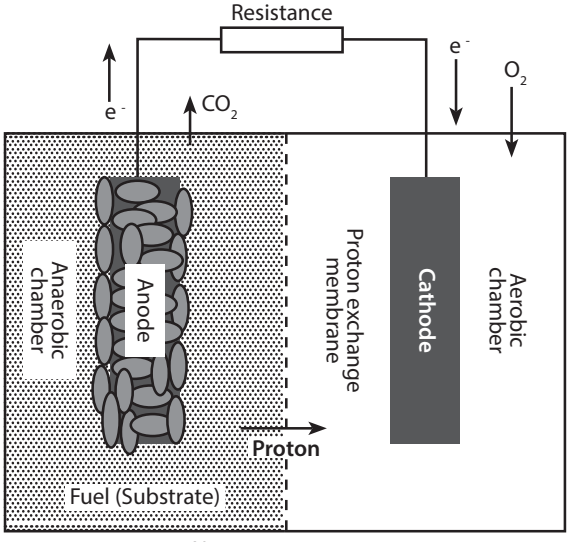
1. Introducción

Las Celdas de Combustible Microbiana (CCM) son una tecnología emergente que generan energía limpia y sostenible a la vez que remueve la materia orgánica de las aguas residuales (Revelo et al., 2013). Las CCM transforman la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica a través de los procesos metabólicos de ciertos microorganismos electrogénicos que se encuentran en ambientes anaerobios como los lodos y los sedimentos de lagos y ríos. Estos microorganismos son capaces de transferir electrones a un electrodo (ánodo) en lugar de un aceptor final como el oxígeno o los compuestos orgánicos (Hernández Fernández et al., 2015).

Las CCM más comunes están compuestas por dos cámaras separadas por una Membrana de Intercambio Protónico (MIP). Una cámara es anaerobia, contiene al ánodo y es donde se deposita el agua residual y los microorganismos, la segunda cámara es aerobia y contiene el cátodo (Revelo et al., 2013). De esta forma, los electrones se transfieren al ánodo y los protones (H+) generados en la cámara anódica atraviesan la MIP hasta llegar al cátodo, en donde reaccionan con el oxígeno para formar agua (Moreno Garrido, 2016). En la figura 1 se muestra una CCM de dos cámaras.

Las primeras investigaciones con CCM fueron realizadas por Michael Cresse Potter en 1910, donde utilizó Escherichia Coli y electrodos de platino (Moreno Garrido, 2016). Sin embargo, la producción de electricidad era tan pequeña que pasó desapercibida para la comunidad científica y no fue hasta 1964 cuando se construyó la primera CCM por Berk y Canfied (Gretel Farias, 2016). Desde entonces, se han incrementado las investigaciones de las CCM utilizando diferentes configuraciones de celdas, electrodos y variados sustratos (Leropoulos, et al., 2005; Liu, H. & Logan, B. 2004; Moreno Garrido, 2016).

Figura 1. *Esquema básico de una celda de combustible microbiana*



Nota. Du et al., 2007.

Estudios recientes han utilizado diferentes configuraciones de CCM y tipos de aguas residuales para generar electricidad, como por ejemplo: aguas residuales de azúcar con dos cámaras en la CCM en Korea (Lee, et al., 2016), dos cámaras en la CCM y aguas residuales de cerveza en Estados Unidos (Zhang et al., 2018), una sola cámara en la CCM y aguas residuales procedentes de la industria del papel en China (Huang & Logan, 2008) y aguas residuales sintéticas provenientes de estiércol de ganado vacuno en Ecuador con dos cámaras en la CCM (Rios Lara, 2016). Otras investigaciones no solo han buscado la remoción de materia orgánica sino la depuración de los compuestos específicos como nitritos y sulfuros (Moreno Garrido, 2016). Los resultados de estas investigaciones muestran que los microorganismos electrogénicos son capaces de generar electricidad y al mismo tiempo remover la contaminación de los diferentes tipos de aguas residuales.

En Colombia, las investigaciones sobre las CCM también ha conseguido importantes avances enfocados en la utilización de aguas residuales sintéticas de rellenos sanitarios, aguas residuales domésticas, aguas residuales procedentes del procesamiento del beneficio del café, entre otras, todo esto en pro de mitigar los impactos ambientales de la región y a la vez ayudar a las empresas y campesinos a suplir sus propios gastos energéticos (Fajardo, 2015; Franco Rosero & Ricaurte Vargas, 2018; Restrepo Toro, 2018).

Por lo tanto, las CCM son una alternativa prometedora para mitigar las consecuencias medioambientales generadas por el consumo de fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles y para disminuir la contaminación de las fuentes hídricas generadas por la industrialización y crecimiento demográfico (Nava Diguero & Castillo Juárez, 2018).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo el monitoreo del desempeño eléctrico y el análisis de la disminución de la carga orgánica de una mezcla de agua residual sintética y lodos anaerobios de una zona de Túquerres, Nariño. La disminución de la carga orgánica se evaluó mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el monitoreo del desempeño eléctrico se realizó con un multímetro en términos de voltaje, densidad de potencia y eficiencia coulómbica.

La DQO se evaluó a partir de una modelación y estimación matemática, teniendo en cuenta los modelos desarrollados en las plantas de tratamiento biológico de aguas residuales siguiendo la metodología de Orozco Jaramillo (2014); se utilizaron sistemas computacionales como Matlab para resolver y obtener resultados aproximados del comportamiento de los fenómenos físicos, químicos y biológicos que suceden en la CCM.

Entre estos modelos se encuentran los modelos basados en ecuaciones diferenciales, modelos de inteligencia artificial, redes neuronales, entre otros (Orozco Jaramillo, 2014; Xia et al., 2018; Gadkari et al., 2018). Los modelos de ecuaciones diferenciales involucran derivadas de una función con sus variables, los modelos de redes neuronales son sistemas que utilizan la ciencia de datos para hacer predicciones de un problema en particular y los modelos de inteligencia artificial se basan en construir modelos computacionales que tratan de imitar el pensamiento racional del ser humano (Xia et al., 2018). En este estudio se utilizó el modelo de ecuaciones diferenciales.

2. Materiales y Métodos

Siguiendo el libro Metodología de la investigación de Hernández Sampieri y otros (2010) y como el objetivo de este estudio fue determinar el desempeño eléctrico y analizar la disminución de carga orgánica del agua residual sintética, el diseño de la investigación fue experimental. El enfoque de la investigación fue elaborado bajo

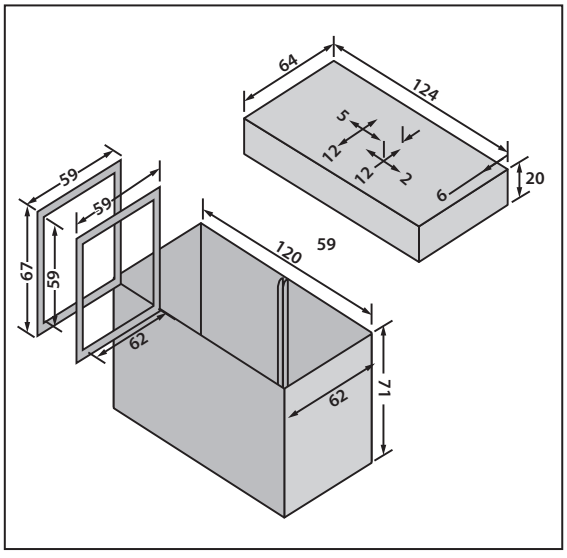
el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, ya que es el que mejor se adaptó a las necesidades y características de esta investigación.

Las variables seleccionadas fueron voltaje, corriente, densidad de potencia, eficiencia coulómbica y demanda química de oxígeno, puesto que son variables medibles que permitieron obtener datos de la realidad para confrontar esta investigación con otros autores.

2.1 Celda de Combustible Microbiana (CCM)

La CCM de doble cámara se diseñó en el software Autodesk Inventor Pro y se imprimió en una impresora MakerBot Replicator utilizando Ácido Poliláctico (PLA), el fondo se recubrió con plástico líquido (véase la figura 2). Cada cámara tiene un volumen útil de 255,6 cm^3, comunicadas por una MIP Nafión 117-DUPONT con área de 44 cm^2.

Figura 2. *Plano de la Celda de Combustible Microbiana*



Es necesario hacer un tratamiento a la MIP con el fin de activar los canales sulfónicos y la selectividad hacia los protones. Este tratamiento se realizó sumergiendo la MIP en peróxido de hidrógeno al 30%, posteriormente, se sumergió en agua desionizada, después en ácido sulfúrico 0,5 M y, finalmente, se lavó de nuevo en agua desionizada. Cada etapa se llevó a cabo durante 1 hora (Alzate Gaviria, et al. 2008).

Los electrodos utilizados fueron de grafito y de acero inoxidable de dimensiones de 12 cm x 2 cm. En la cámara anódica se utilizó grafito de placa plana y en la cámara catódica un electrodo de acero inoxidable. Además, se hizo una conexión de la cámara catódica a un aireador por medio de una manguera.

2.2 Agua Residual Sintética (ARS) y lodos anaerobios

El Agua Residual Sintética (ARS) se preparó con base en los autores Oh y otros (2004). La composición del ARS se muestra en la tabla 1, se utilizó glucosa como sustrato, además se agregaron micronutrientes y macronutrientes necesarios para el crecimiento microbiano. Cabe mencionar que en esta investigación no se desarrolló una identificación de las especies bacterianas presentes en los lodos anaerobios utilizados.

Tabla 1. *Composición del ARS*

Compuesto	Cantidad
Glucosa (C6H12O6)	4 g
Cloruro de amonio (NH4Cl)	310 mg
Cloruro de potasio (KCl)	130 mg
Dihidrógeno fosfato de sodio monohidratado (NaH2PO4.H2O)	5,72 g
Hidrogeno fosfato de sodio anhidro (Na2HPO4)	2,44 g

El lodo se recolectó de aguas estancadas en el municipio de Túquerres en las coordenadas: latitud 1,077087 y longitud -77,615834. Primero se retiraron las raíces con la ayuda de un tamiz de cocina y luego se filtró al vacío para retirar el exceso de agua. Se pesaron muestras de 24 g y se depositaron en tubos falcon.

En la cámara anódica se utilizó una mezcla de 12 g de lodo con 160 mL de ARS al 0,022 M de glucosa (Kim, et al., 2005). En la cámara catódica se utilizó 180 mL de buffer fosfato a pH 7.

2.3 Desempeño Eléctrico

El desempeño eléctrico de una CCM se realizó a partir del voltaje, la corriente, la densidad de potencia y la eficiencia coulómbica.

El voltaje y la corriente de la CCM se midieron con la ayuda de dos multímetros digitales marcas *Fluke True RMS* y *Peak Teach pruf*. El circuito se completó con la ayuda de una resistencia de 920 Ω. La ecuación 1 se utilizó para determinar la potencia generada por la CCM.

$$P = V \, x \, 1 \qquad (1)$$

Donde, P: es la potencia medida en vatios (W), V: es voltaje medido en voltios (V), I: es corriente eléctrica medida en amperios (A).

La Densidad de Potencia (DP) es la cantidad de energía generada por unidad de volumen o área del ánodo (véase la ecuación 2).

$$DP = \frac{V \, x \, 1}{an} \qquad (2)$$

Donde, DP: es densidad de potencia (Watt/m^2), V: es voltaje medido en voltios (V), I: es corriente eléctrica medida en amperios (A), an: es el área del ánodo en m^2.

La eficiencia de la corriente se determinó con base a la Eficiencia Coulómbica (EC), que se define como la cantidad de materia orgánica que se recupera como electricidad (ecuación 3), es decir, es el número de coulombs transferidos si todo el sustrato fuera empleado para la producción de corriente, también se entiende como la fracción de electrones recuperados como corriente eléctrica de los que están presentes en la materia orgánica (Franco & Ricaurte Vargas, 2018).

$$EC = \frac{Qp}{Qt} \, x \, 100\% \qquad (3)$$

Donde, Qp: es la cantidad de coulombs encontrados experimentalmente, Qt: es la cantidad de coulombs teóricos.

Qp es el área bajo la curva de la corriente en función del tiempo (ecuación 4), para el cálculo de este valor se utilizó el software *Matlab*.

$$Qp = \int I dt \qquad (4)$$

Donde, I: es corriente eléctrica medida en Amperios (A), t: tiempo en segundos.

La cantidad teórica de coulombs se determinó con ayuda de la ecuación 5.

$$Qt = \frac{F \, x \, b \, x \, S \, x \, va}{M} \qquad (5)$$

Donde, F: es la constante de Faraday (96,485 C/mol. e-), b: número de electrones producidos por mol de sustrato (para un mol de glucosa son 24 electrones), S: es la concentración molar de sustrato, va: es el volumen del líquido en la cámara anódica (L), M: es el peso molecular del sustrato empleado en la CCM.

2.4 Evaluación de la Remoción de Materia Orgánica

La remoción de materia orgánica se siguió a través de una modelación y estimación matemática según la metodología descrita por Orozco Jaramillo (2014). El modelo matemático se enfoca en la remoción de sustrato y la producción de biomasa. La remoción de sustrato va dirigida hacia la remoción de materia orgánica soluble e insoluble medida como DQO (Orozco Jaramillo, 2014). La producción de biomasa o crecimiento bacteriano se midió en términos de Solidos Suspendidos Volátiles (SSV), es decir, en términos de peso y no por conteo de placas, para tener una consistencia matemática con las otras variables (Orozco Jaramillo, 2014).

En el crecimiento microbiano por peso se distinguen tres fases: la fase de crecimiento exponencial, fase en la que hay un crecimiento balanceado porque las bacterias tienen toda las condiciones y batería enzimática para alimentarse, esta etapa también es conocida como Condiciones de Abundancia (CA) (Orozco Jaramillo, 2014). La segunda fase ocurre cuando el sustrato disminuye, existe una competencia por el alimento y las bacterias entran en Condiciones de Inanición (CI), esta fase comúnmente es conocida como fase estacionaria. Este es el estado en que operan la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En la última fase se agota el sustrato o alimento y, por ende, las bacterias empiezan a morir, esta fase es llamada fase de declinación y muerte (Orozco Jaramillo, 2014).

2.4.1 Remoción de sustrato

La ecuación 6 es conocida como la ecuación de Lawrence y McCarty y tiene la misma forma de la ecuación de Monod, cumple con las condiciones de abundancia y condiciones de inanición.

$$\frac{-dS}{Xdt} = \frac{kS}{k_m + S} \; x \; \frac{1}{Y} \qquad (6)$$

Donde, X: Biomasa en el reactor (mgSSV/L), S: Sustrato en el reactor (mg DQO/L), k: constante cinética, máxima de remoción unitaria (d^{-1}), km: constante cinética de saturación de Monod (mg DQO/L), Y: es coeficiente estequiométrico de producción (mg SSVL/mgDQO).

En condiciones de inanición, tenemos que $k_m >> S$ y la ecuación 6 se convierten en la ecuación llamada Eckenfelder (ecuación 7), que es el caso que interesa para resolver este problema.

$$\frac{-dS}{Xdt} = \frac{kS}{k_m} = KS \qquad (7)$$

Donde, K: k/k_m = tasa de remoción de sustrato (mg dHa. dHa/L).

2.4.3 Producción de biomasa

La producción de biomasa debe abordarse desde dos condiciones diferentes para el caso anaerobio y el caso aerobio. En el caso anaerobio la conversión de sustrato es realizada por al menos cinco clases diferentes de microorganismos, entre Eubacterias y Arqueobacterias, este tipo de microbiología es más complejo debido a todas las ecuaciones cinéticas que rigen su comportamiento (Orozco Jaramillo, 2014).

El crecimiento de las bacterias o producción de biomasa se ha interpretado como se muestra en la ecuación 8.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{kS}{k_m + S} * X - k_e * X \qquad (8)$$

Donde, $\frac{dX}{Xdt}$ = tasa neta de crecimiento de biomasa (d^{-1}), k_e: coeficiente endógeno (d^{-1}).

Los coeficientes cinéticos se tomaron de los autores Bhunia y Ghangrekar (2008). Los investi-

gadores determinaron estos coeficientes en un reactor anaerobio de flujo ascendente también conocido como RAFA o UASB, por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), en el que se trataron aguas residuales en un rango de 300-4000 mg/L DQO. Los estudios simultáneos de los reactores UASB y CCM también se llevaron a cabo por Martínez Santacruz y otros (2016) en los que se encontraron porcentaje de remoción de DQO similares para ambos sistemas, con UASB de 76% y con CCM del 60%.

Para utilizar estas constantes cinéticas se debe hacer una corrección por temperatura utilizando la ecuación modificada de Arrhenius (ecuación 9).

$$kT = k_{20°}\,\theta^{T-20} \quad (9)$$

Donde, θ es 1,03 para lodos anaerobios y k: constante cinética a 20 °C (Orozco Jaramillo, 2014).

La tabla 2 muestra las constantes cinéticas utilizadas en la modelación y la corrección por temperatura en las condiciones de Túquerres a 14 °C.

Tabla 2. *Constantes cinéticas utilizadas en la modelación y la corrección por temperatura*

Constante cinética	Nombre de la constante	Unidades	(Bhunia y Ghangrekar, 2008)	Corrección por temperatura
k	Constante cinética de máxima remoción unitaria	(d-1)	0,058	0,048
km	Constante cinética de saturación de Monod	(mg DQO/L)	226,1	189,3
Y	Coeficiente estequiométrico de producción	(mg SSVL/mgDQO)	0,083	0,083
ke	Coeficiente endógeno o coeficiente de decaimiento	(d-1)	0,083	0,005

3. Resultados

3.1 Desempeño eléctrico

Se obtuvieron diferentes valores de voltaje y corriente durante el tratamiento del agua residual en la CCM (figura 3). La CCM funcionó durante 123 minutos, detectándose un voltaje máximo de 2,1 mV y una corriente de 1 µA en el primer minuto tras el inicio del montaje de la CCM. El cálculo de la potencia se realizó con la ecuación 1, registrando un máximo de 2,1 nW.

En la figura 4 se muestra los resultados de densidad de potencia. El valor máximo de DP fue de 875 nW/m^2, el cual se detectó al inicio del arranque de la CCM y se obtuvo un mínimo de 25nW/m^2 a los 67 minutos, momento en el que se agregó 12 g de lodo. En ese instante la DP comenzó a aumentar hasta alcanzar un pico de 712 nW/m^2. Lo anterior muestra que es necesario agregar una mayor cantidad de lodo en la cámara anódica para lograr una mayor DP, y además aumentar la concentración de glucosa (Fajardo, 2015). La limitación de lodo podría indicar ausencia de

suficientes consorcios bacterianos encargados de la producción de energía y remoción de DQO (Fajardo, 2015).

Fajardo (2015) determinó que, utilizando concentraciones de 0,25 M de glucosa, la DP fue mayor comparada con concentraciones más bajas de glucosa. Así mismo, autores como Alzate y otros (2008) encontraron que cuando se aumentó la concentración de sustrato, el voltaje también aumentó. Incrementar y analizar la influencia de la concentración de glucosa en la generación de energía eléctrica puede ser determinante a la hora de mejorar la EC y DP.

Es difícil comparar estos resultados con otras investigaciones, ya que las condiciones de operación son diferentes, por lo tanto, se realizó en términos de DP, que representa la generación de potencia por unidad de área del ánodo utilizado. Los valores de voltaje, EC y DP de esta investigación están por debajo a los reportados en otros estudios (véase la tabla 3), la baja EC y DP pueden deberse a la composición compleja de las aguas residuales y a la amplia variedad microbiana presente (Liu & Logan, 2004; Watanabe, 2008). Los autores afirman que el desempeño eléctrico de una CCM mejora al realizar una preaclimatación o colonización de las bacterias sobre el ánodo, el cual no se realizó. Sin embargo, autores como Sun y otros (2016) encontraron que esta fase de colonización podría inducir al desarrollo de especies microbianas de población fermentativa que obstaculizan la formación de las biopelículas electroactivas.

Además, durante esta preaclimatación, se forma un revestimiento interno de células muertas o inactivas, que disminuye la eficiencia eléctrica (Sun, et al., 2016). Por lo tanto, comprender y estudiar los procesos de colonización e invasión de las bacterias es una estrategia prometedora para mejorar los rendimientos energéticos de una CCM.

La resistencia externa también influye en la DP. Se ha comprobado que resistencias más bajas aumentan su producción y al mismo tiempo aumentan la remoción de materia orgánica (Llontop, 2018; Alzate et al., 2008). Ensayar con resistencias más pequeñas podría mostrar un mejor desempeño eléctrico.

Para entender mejor la cantidad de energía eléctrica producida por la CCM, es útil compararla con la energía requerida para hacer funcionar un dispositivo eléctrico. Por ejemplo, un bombillo LED de 5 mm de radio requiere 36 mW para encenderse (Solo Arduino, 2013). Para encender el bombillo LED con los resultados de esta investigación, es necesario aumentar la potencia máxima detectada en diecisiete veces.

Figura 3. *Generación de electricidad utilizando una resistencia de 920 Ω y una concentración de glucosa al 0,022M*

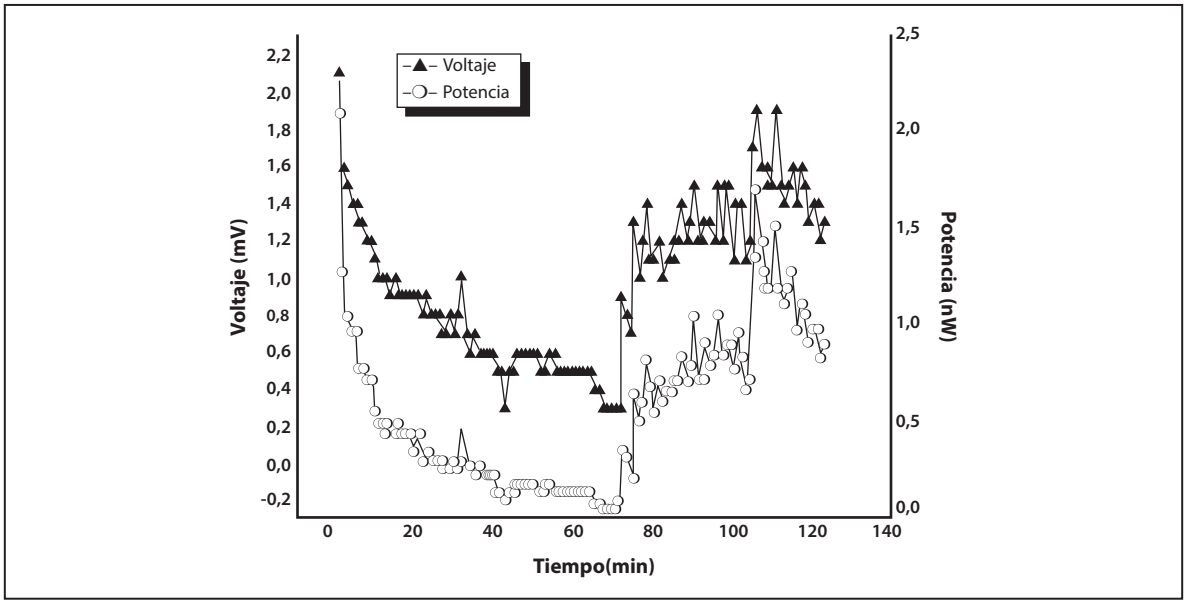


Figura 4. *Densidad de potencia obtenida durante 123 minutos de funcionamiento de la CCM*

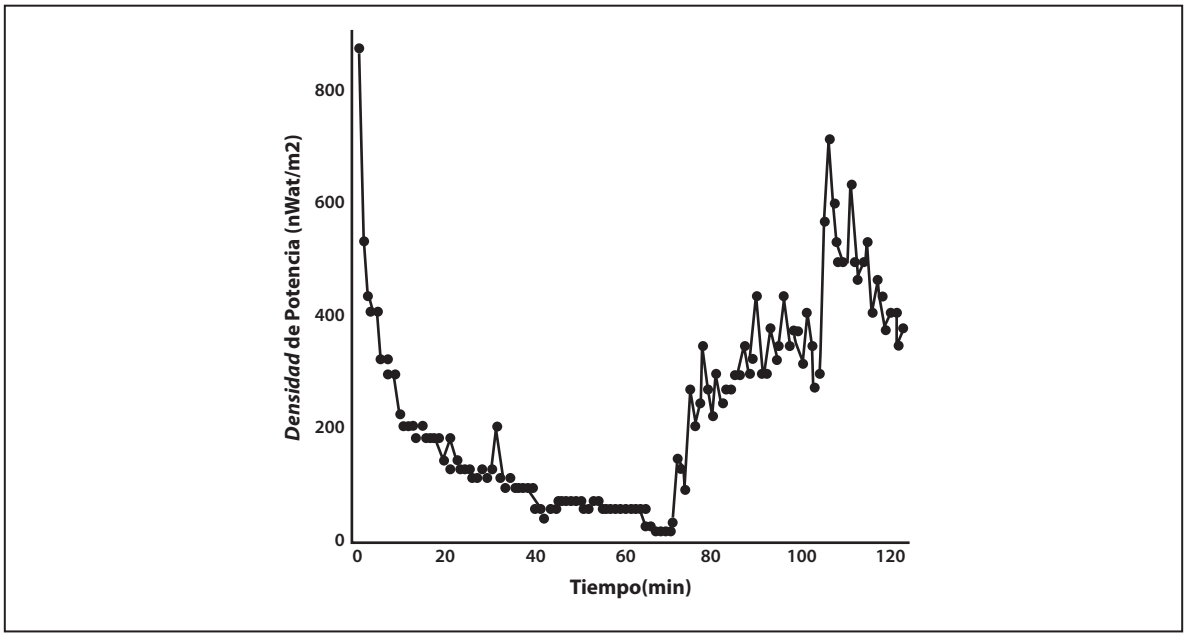


Tabla 3. *Comparación de parámetros de desempeño eléctrico y remoción de demanda química de oxígeno en celdas de combustible microbiana alimentada con diferentes sustratos*

Sustrato e inóculo	Cátodo y ánodo	Densidad de potencia (mW/m2)	Eficiencia Coulómbica %)	Condiciones	% Remoción DQO	Referencia
Glucosa y agua residual doméstica	Papel carbón	26	12	DQO: 50–220 mg/L TO: 120 h	80	(Liu, Ramnarayanan y Logan, 2004)
Glucosa y agua residual doméstica	Carbón rígido y Papel grafito	14	-	DQO:2250-2268 mg/L TO: 8 h	71	(Buitrón y Pérez, 2011)
Glucosa y aguas residual de melaza	Fieltros de carbono	17	-	DQO:10,000 mg/L TO: 25 d	50	(Yeong Lee et al., 2016
Glucosa y agua residual doméstica	Papel carbón	336 - 640	60	TO: 120d	82	(Alzate Gaviria et al., 2008)
Agua residual de molinos de arroz	Grafito y acero inoxidable	230 - 270	14,5 - 21,2	DQO: 2,200–2,250 mg/L TO: 25 d	96,5	(Behera et al., 2010)
Agua residual doméstica	Grafito poroso y grafito cilíndrico	25	-	DQO: 300 mg/L TO: 12 d	0,25	(Rodrigo et al., 2007)
Glucosa y lodos anaerobios relleno sanitario	Grafito	147,36	10	DQO:1000 mg/L TO: 41 d	90	(Fajardo, 2015)
Lodos anaerobios de agua residual doméstica	Tela de carbón y fibra de carbón	173	8	DQO: 220-370 mg/L TO: 12 h	60	(Martínez Santacruz et al., 2016)
Lodos anaerobios de agua residual domestica	Grafito	0,72	0,07	DQO: 550-990 mg/L TO:24 d	50 - 60	(Franco y Ricaurte Vargas, 2018)
Glucosa y lodos anaerobios	Grafito y acero inoxidable	$8{,}7x10^{-4}$	$7{,}310^{-3}$	DQO:1690 mg/L TO: 7 d	97,3%	Este estudio

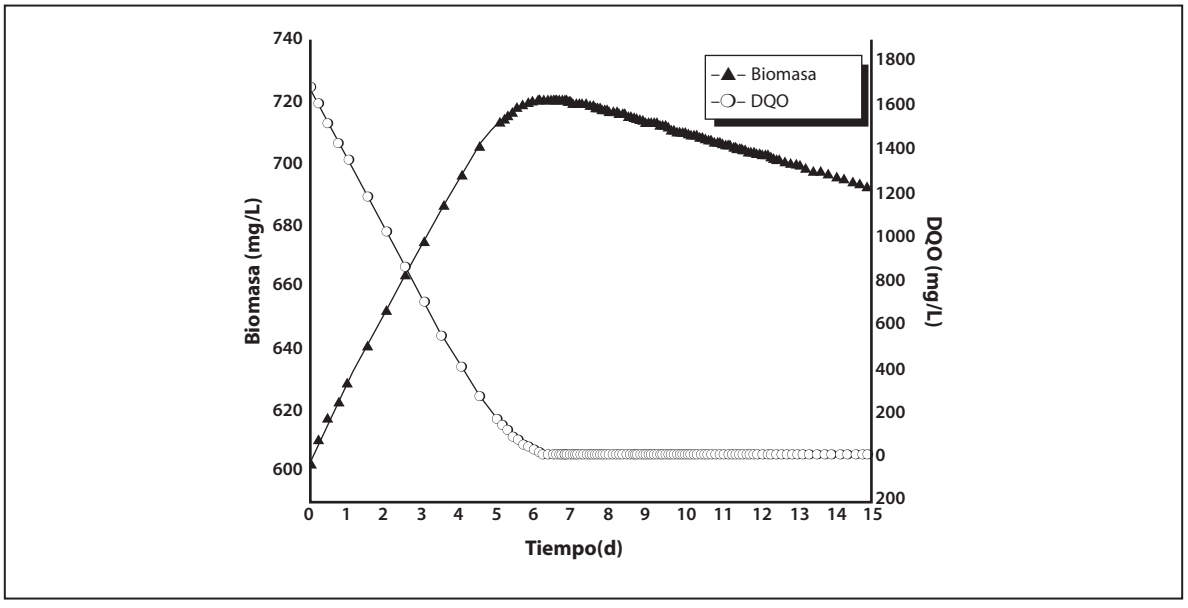
Nota. Los autores, adoptada de otras investigaciones, DQO: Demanda Química de Oxígeno, TO: Tiempo de operación.

3.2 Remoción de la Materia Orgánica

El modelo matemático utilizó la ecuación 6 y la ecuación 8 para la operación de un reactor por lotes y se resolvieron con el software Matlab. Las constantes cinéticas corregidas en función de la temperatura de Túquerres se muestran en la tabla 2. La figura 5 muestra los resultados obtenidos para la remoción de DQO. En los datos de dispersión de la biomasa se observa que aproximadamente a partir del séptimo día las bacterias comienzan a morir debido al agotamiento de las reservas de sustrato, entrando en la fase endógena. Alrededor del primer día ya se tiene una remoción del 20% de DQO y al sexto día la remoción ya ha alcanzado el 97,3%.

En la tabla 3 se muestra una comparación de parámetros de remoción de DQO en CCM, realizadas en diferentes investigaciones.

Figura 5. *Remoción de materia orgánica y producción de biomasa realizada en Matlab*



Liu, Ramnarayanan y Logan (2004) reportaron de una remoción del 80% de DQO a partir del quinto día. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento similar al de esta investigación, sin embargo, existen porcentajes de remociones superiores al 90% encontrados después de los 25 días (Behera et al., 2010; Fajardo, 2015). La variación en estos resultados se debe a que las condiciones de operación son diferentes para cada estudio. Variables como concentración de sustrato, inóculo utilizado, carga orgánica a remover, tamaño de CCM delimitan estas eficiencias.

Cabe mencionar que este estudio se realizó a partir de una modelación y estimación matemática, resultados que no fueron calibrados ni validados a partir de la experimentación en laboratorio. Igualmente, no se tuvieron en cuenta variables como cinética de microorganismos electrogénicos, volumen del reactor y presencias de gases disueltos. Sin embargo, brindan una idea de su comportamiento y remoción de la materia orgánica.

4. Conclusiones

Los resultados de desempeño eléctrico fueron bajos en comparación con los reportados en la literatura, la preaclimatación en el ánodo y los ensayos con diferentes y mayores concentraciones de lodos anaerobios y glucosa podrían ayudar a aumentar la densidad de potencia; lo que es un sistema prometedor para ser utilizado en las plantas de tratamiento de aguas residuales para suplir sus propios gastos energéticos.

La modelación de la demanda química de oxígeno permitió conocer el comportamiento del crecimiento microbiano y la remoción de DQO. Sin embargo, para dotar de mayor rigor al modelo y tener resultados más cercanos a la realidad, se deben tener en cuenta variables medidas en el laboratorio como los gases disueltos y la cinética específica para ese tipo de microorganismos.

La simulación matemática es una poderosa herramienta que, junto con la experimentación en laboratorio, ayudaría a predecir y calibrar estos modelos para su uso en futuras plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales.

5. Referencias

Alzate Gaviria, L., Fuentes Albarrán, C., Álvarez Gallegos, A., & Sebastian, P. J. (2008). Generación de Electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. Interciencia, 33(7), 503-509.

Behera, M., Jana, P. S., More, T. T., & Ghangrekar, M. M. (2010). Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH. Bioelectrochemistry, 79(2), 228-233. https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2010.06.002.

Bhunia, P., & Ghangrekar, M. M. (2008). Analysis, evaluation, and optimization of kinetic parameters for performance appraisal and design of UASB reactors. Bioresource Technology, 99 (7), 2132-2140. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.053.

Buitrón, G., y Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 14(1), 5-11.

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. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004.

Fajardo, D. (2015). Evaluación de la remoción de materia orgánica y el desempeño electrico en una celda de combustible microbiana con agua residual sintética. [Tesis de pregrado, Universidad de Nariño]. Repositorio Institucional-Universidad de Nariño.

Franco, L., y Ricaurte Vargas, S. A. (2018). Evaluación de una Celda de Combustible Miccrobiana para el tratamiento de agua residual del campus universitario Meléndez. [Tesis de pregrado, Universidad del Valle]:Repositorio Institucional-Universidad del Valle.

Gadkari, S., Gu, S., & Sadhukhan, J. (2018). Towards automated design of bioelectrochemical systems: A comprehensive review of mathematical models. Chemical Engineering Journal, 343, 303-316. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.005.

Gretel Farias, N. (2016). Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas bioelectroquímicas microbianas para la producción de energías alternas. [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnlógico en Electroquímica.]. Repositorio Institucional-- Centro de investigación y desarrollo tecnlógico en electroquímica].

Hernández Fernández, F. J., Perez de los Ríos, A., Salar García, M. J., Ortiz Martínez, V. M., Lozano Blanco, L. J., Godinez, C., & Tomas Alonso, F. (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

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). Metodología de la investigación. (Mc-Gram-Hill, Ed.) (5th ed.). México.

Huang, L., & Logan, B. E. (2008). Electricity generation and treatment of paper recycling wastewater using a microbial fuel cell. Applied Microbiology and Biotechnology, 80(2), 349–355. https://doi.org/10.1007/s00253-008-1546-7.

Ieropoulos, I. A., Greenman, J., Melhuish, C., & Hart, J. (2005). Comparative study of three types of microbial fuel cell. Enzyme and Microbial Technology, 37(2), 238–245. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.03.006.

Kim, J. R., Min, B., & Logan, B. E. (2005). Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. Microbial Tecnology, 68(1) ,23-30. doi: 10.1007/s00253-004-1845-6.

Lee, Y. Y., Kim, T. G., & Cho, K. S. (2016). Characterization of the COD removal, electricity generation, and bacterial communities in microbial fuel cells treating molasses wastewater. Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 51(13), 1131–1138. https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1199926

Liu, H., & Logan, B. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. Env. Sci. Technol, 38, 4040-4046. https://doi.org/10.1021/es0499344.

Liu, H., Ramnarayanan , R., & Logan, B. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cells. Env. Sci. Technol, 38(7), 2281-2285. doi:https://doi.org/10.1021/es034923g

Llontop Guerrero, E. O. (2018). Influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiana. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo]. Repositorio Institucional-Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Martínez Santacruz, C. Y., Herrera López, D., Gutiérrez Hernández, R. F., y Bello Mendoza, R. (2016). Tratamiento de agua residual doméstica mediante un reactor rafa y una celda microbiana de combustible, 32(3), 267–279. https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.02

Moreno Garrido, L. (2016). Simulación de la operación de una Microbial Fuel Cell para aplicación en sistemas aislados de la red. [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio Institucional-Universidad de Sevilla.

Nava Diguero, P., y Castillo Juárez, M. (2018). Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad: Agua, energía y contaminación. Revista de Ingeniería Innovativa, 2(5), 18–34. Retrieved from www.ecorfan.org/republicofperu.

Oh, S., Min, B., & Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. Environ Sci Technol,38 (18), 4900-4904. https://doi.org/10.1021/es049422p.

Orozco Jaramillo, Á. (2014). Bioingeniería de las Aguas Residuales, ACODAL.

Restrepo Toro, J. D. (16 de noviembre de 2018). Profesora de la UdeA ganó el Newton Prize 2018. UdeA noticias. http://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/noticias-academia.

Revelo, D., Hurtado, N. H., y Ruíz, 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.

Rios Lara, S. C. (2016). Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, estación experimental TUNSHI [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.]. Repositorio Institucional- Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Rodrigo, M. A., Canizares, P., Lobato, J., Paz, R., Sáez, C., & Linares, J. J. (2007). Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. Journal of Power Sources, 169(1), 198-204. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.01.054.

Solo Arduino. (5 de septiembre de 2013). Cálculo de la resistencia para un LED. https://soloarduino.blogspot.com/2013/07/calculo-de-la-resistencia-para-un-led.html.

Sun, D., Chen, J., Huang, H., Liu, W., Ye, Y., & Cheng, S. (2016). The effect of biofilm thickness on electrochemical activity of Geobacter sulfurreducens. International Journal of Hydrogen Energy, 41 (37), 16523-16528. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.163.

Watanabe, K. (2008). Recent developments in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy. J Biosci Bioeng, 106(6), 528-536. https://doi.org/10.1263/jbb.106.528.

Xia, C., Zhanga, D., Pedrycza, W., Zhua, Y., & Guo, Y. (2018). Models for Microbial Fuel Cells: A critical review. Journal of Power Sources, 373, 119-131. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.001.

Yeong Lee, Y., Kim, T. G., & Cho, K. S. (2016). Characterization of the COD removal, electricity generation, and bacterial communities in microbial fuel cells treating molasses wastewater. Journal of Environmental Science and Health, 51(13), 1131-1138. doi:https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1199926.

Zhang, Y., Chen, X., Yuan, Y., Lu, X., Yang, Z., Wang, Y., & Sun, J. (2018). ScienceDirect Long-term effect of carbon nanotubes on electrochemical properties and microbial community of electrochemically active biofilms in microbial fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy, 43(33), 16240–16247. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.144.

SERVICIOS TECNOLÓGICOS

Laboratorio de Electrónica

Laboratorio de Ensayos para la Calidad de Café

SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN | NOVA

CENTRO DE DESARROLLO AGROEMPRESARIAL Y TURÍSTICO DEL HUILA

Cr7 N° 5-67, La Plata, Huila, Colombia.

Teléfono: (8) 8370987 Ext. 83737 - 83733

www.sena.edu.co

http://senacdath.blogspot.com

REVISTA *NOVA*

Cr7 N° 5-67, La Plata, Huila, Colombia.

Correo: revistanova@sena.edu.co

Teléfono: (8) 8370987 Ext. 83737

http://revistas.sena.edu.co/index.php/rnova/index

http://senacdath.blogspot.com