

INFLUENCIA DEL DISEÑO DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS EN LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

INFLUENCE OF MICROBIAL FUEL CELL (MFC) DESIGN ON ELECTRICITY PRODUCTION

Maribel Andrango M.^{1*} & Raúl Bahamonde S.²

Recibido: 11 de julio 2024 / Aceptado: 02 de diciembre 2024
DOI: 10.26807/ia.v13i1.290

Palabras clave: aguas residuales de la industria textil, bioenergía, degradación de colorantes, pilas de combustible microbianas, tratamiento de aguas residuales.

Keywords: bioenergy, dye degradation, textile industry wastewater, microbial fuel cells, wastewater treatment.

¹ Universidad Central del Ecuador, Centro de Química, Quito-Ecuador (*correspondencia: maandrango@uce.edu.ec)

² Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Químicas, Laboratorio de Energías Renovables, Quito-Ecuador (rabahamonde@uce.edu.ec)

RESUMEN

Las pilas de combustible microbianas (PCMs) han tenido una gran aceptación como un método eco-amigable para el tratamiento de aguas residuales y generación de bioenergía. En esta investigación se evaluó arquitecturas de PCMs tipo H y de una cámara utilizando como sustrato aguas residuales de la industria textil, membrana de intercambio; celofán y puente salino y dos tamaños de electrodos. El desempeño de las PCMs en la generación de bioelectricidad y tratamiento del agua fue monitoreado por seis días mediante el potencial a circuito abierto (CA) y cerrado (CC), intensidad de corriente (I), densidad de potencia (D_p), eficiencia coulombica (% EC), remoción de color (% RC) y remoción de demanda química de oxígeno (% R_{DQO}). El estudio determinó que en las PCMs tipo H la producción de bioenergía es afectada por el tipo de membrana e influye en el CA, CC, I y el tamaño del electrodo influye en la I y EC, si nos referimos al tratamiento del agua tanto el tipo de membrana y el tamaño del electrodo afectan el % RC y % R_{DQO} . En las PCMs de una cámara la producción de bioenergía y el tratamiento del agua es afectado por el tamaño del electrodo e influye en CA, % RC y % R_{DQO} .

ABSTRACT

Microbial fuel cells (MFC's) have been widely accepted as an eco-friendly method for wastewater treatment and bioenergy generation. In this research, architectures of MFC type H and a chamber were evaluated using wastewater from the textile industry, exchange membrane; cellophane and salt bridge and two sizes of electrodes. The performance of the MFC's in bioelectricity generation and water treatment was monitored for six days using open circuit (OC) and closed circuit (CC) potential, current intensity (I), power density (PD), coulombic efficiency (%EC), color removal (%CR) and COD removal (% R_{COD}). The study determined that in type H MFC's the production of bioenergy is affected by the type of membrane and influences the OC, CC, I and the size of the electrode influences the I and %EC, if we refer to water treatment both the type of membrane and the size of the electrode affect the %CR and % R_{COD} . In MFC's single-chamber, bioenergy production and water treatment are affected by electrode size and influence OC, %CR and % R_{COD} .

INTRODUCCIÓN

Las PCMs son reactores bioelectroquímicos que convierten la energía química directamente en energía eléctrica. Estos reactores además, se han desarrollado no solo como una alternativa de generación de energía eléctrica sino también como una alternativa de tratamiento de aguas residual (Sánchez, 2021), esta energía denominada bioenergía utiliza bacterias exoelectrogénicas (como *Shewanella*, *Geobacter*, etc.), es decir, que tienen la capacidad de transferir los electrones fuera de la membrana celular a compuestos químicos o materiales que no son aceptores de electrones inmediatos, dichas bacterias utilizan compuestos orgánicos en la actividad metabólica oxidativa y forman biopelículas, características importantes en PCMs (Duche & Bahamonde, 2021; Li et al., 2018; Logan, 2008).

Un esquema general de este tipo de reactores se muestra en la Figura 1 que se compone de

una cámara anódica o anaerobia y otra cámara catódica o aerobia separadas de una membrana de intercambio de protones y cada una con un electrodo. En la cámara anódica se suministra materia orgánica o sustratos más complejos como aguas residuales de la industria (Patel et al., 2021a; Sonu et al., 2020), los que son oxidados por acción de un microorganismo exoelectrogénico produciendo electrones y protones; los electrones producidos se transfieren a través de un circuito externo a la cámara catódica. Simultáneamente, los protones generados en la cámara anódica migran hacia la cámara catódica a través de la membrana de intercambio para equilibrar las cargas. En la cámara catódica los electrones, protones y oxígeno se combinan para producir agua. El oxígeno puede ser tomado del medio ambiente o suministrado de un reservorio. Estas pilas pueden llegar a producir una diferencia de potencial de 1,1V si se utiliza como sustrato acetato (Duche & Bahamonde, 2021).

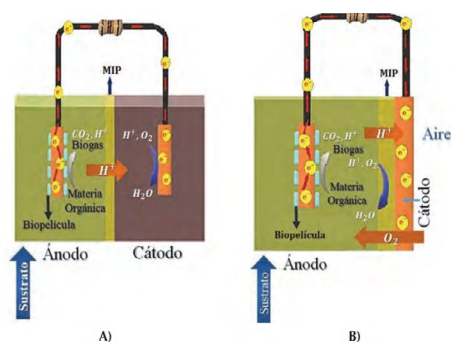


Figura 1. Esquema general de un reactor de pila de combustible microbiano (PCM)
A) PCM tipo H B) PCM de una cámara

Las PCMs llaman la atención por su versatilidad al degradar compuestos como colorantes azoicos que se encuentran presentes en aguas residuales textiles (Patel et al., 2021b; Rathour et al., 2019a) y son considerados tóxicos, peligrosos, además pueden afectar al medio ambiente y al bienestar de una comunidad.

Dentro de los factores que afectan al rendimiento de las PCMs se encuentran el tipo de sustrato, los microorganismos, la arquitectura, el tipo de membrana de intercambio iónico, las condiciones

de operación y el mecanismo de transferencia (Sánchez, 2021) lo que conlleva a tener una gran variedad de materiales para cada componente de las PCMs que requieren de una evaluación en la influencia de generación de electricidad para optimizar el tratamiento de aguas residuales, por lo que en esta investigación se evaluó la influencia de la membrana de intercambio, la arquitectura y el tamaño del electrodo en un sustrato de agua residual de la industria textil tomando en consideración materiales de bajo costo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Varios de los componentes de las PCMs fueron de fácil acceso y algunos fueron reciclados.

Reactivos y materiales

Los reactivos utilizados fueron: ácido nítrico; cloruro de potasio; agar-agar (Merck ®, Alemania); caldo BHI (Difco IM & BBL, USA); Set de viales para DQO (Hach ®, Alemania); Sacarosa; dióxido de carbono (Linde ®, Ecuador).

Como materiales se utilizó: tinta conductora (Bare conductive ®, Reino Unido); Alambre de Ni-Ti (Azdent, China); pega epóxica (PC Superepoxi ®, USA); membrana de celofán (PapelesaCo., Ltd, Ecuador); papel filtro (Macherey-Nagel ® España).

Armado de las pilas de combustible microbiano

Se ha observado que existen

varios tipos de arquitecturas entre las más conocidas las PCMs tipo H o de dos cámaras y las PCMs de una cámara (Sánchez, 2021) las mismas que fueron utilizadas en esta investigación como se muestra en la Figura 2A y 2B.

Para la investigación se armaron seis diseños de PCMs variando el tipo de membrana de intercambio, el tamaño del electrodo y la arquitectura como se describe en la Tabla 1.

Cada uno de los diseños de PCMs fueron armados con piezas de polipropileno de fácil acceso. Estas piezas fueron tapones de 1", neplo de 1/2", T reductora de 1" a 1/2" y se unieron con pega con fibra de cáñamo y teflón. Antes de operar las PCMs cada pieza se desinfecto con una solución de hipoclorito de sodio al 5 % y se lavó con agua destilada esterilizada.

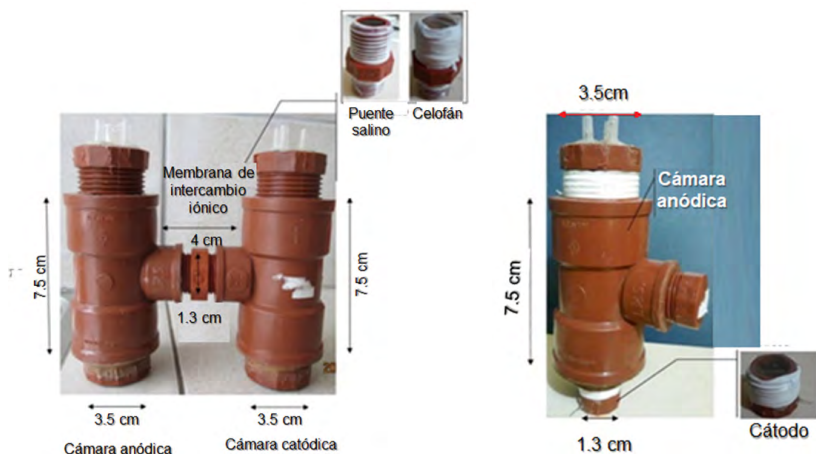


Figura 2. A) Esquema de la pila de combustible microbiano (PCM) con arquitectura tipo H con membrana de intercambio de celofán y puente salino soportados en neoplos y con cámara anódica y catódica de 50 mL B) Esquema de la PCM con arquitectura de cámara única de 50 mL con membrana de celofán soportado en un neplo modificado

Tabla 1. Diseños de pila de combustible microbiano (PCMs) con sus características evaluadas

Diseño	Arquitectura	Membrana de intercambio	Tamaño del electrodo del ánodo
T8	Tipo H	Puente salino	Grande
T9	Tipo H	Celofán	Grande
T10	Tipo H	Puente salino	Pequeño
T11	Tipo H	Celofán	Pequeño
T12	Cámara única	Celofán	Pequeño
T13	Cámara única	Celofán	Grande

Preparación de los electrodos

Los electrodos de grafito fueron aislados de pilas secas recicladas (marca eveready ® y tamaño; tipo

D y AA), recibieron un tratamiento térmico y un tratamiento químico de digestión ácida con ácido nítrico (5,00 %) durante 20 min y lavados en un baño ultrasónico

durante 15 min con agua destilada (Arboleda Avilés et al., 2019). Los electrodos de grafito fueron acoplados a un alambre conductor de Ni-Ti con pintura conductora y pega epóxica y aislado con una cobertura plástica, todos los materiales utilizados son inocuos a las bacterias y no corrosivos con el sustrato, características importantes en la construcción de PCMs (Rea Santiago et al., 2021).

El electrodo del ánodo fue modificado con el crecimiento de una biopelícula para tener una mayor cantidad de bacterias electrogénicas en contacto directo con el electrodo y por tanto una mejor transferencia de electrones. Para la formación de la biopelícula los electrodos fueron sumergidos en una solución que contenía caldo nutritivo cerebro-corazón (siglas en ingles BHI) (35 g L^{-1}), agua residual e inóculo de bacterias electrogénicas ($6 \times 10^6 \text{ UFC mL}^{-1}$), dichas bacterias fueron aisladas de sedimentos del embalse Amaluza de la Presa Daniel Palacios (Represa Paute-Ecuador), y fueron encubadas en

condiciones anaerobias por 72 h a $37 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Arboleda Avilés et al., 2019; Rea Santiago et al., 2021).

Los electrodos del ánodo eran de forma cilíndrica como se muestra en la Figura 3 con áreas geométricas de $5,44 \text{ cm}^2$ (electrodo grande) y $2,51 \text{ cm}^2$ (electrodo pequeño) mientras que, los electrodos del cátodo tenían áreas geométricas de $5,44 \text{ cm}^2$ y $0,50 \text{ cm}^2$.



Figura 3. Electrodos de barras de carbono o grafito

Preparación de membrana de intercambio

Como membrana de intercambio se utilizó puente salino y membrana de celofán ya que son de bajo costo y se ha logrado obtener en otros estudios diferencias de potenciales desde

350 a 800 mV y densidades de potencia entre 2,25 y 6,46 mW m⁻² respectivamente (Logroño et al., 2017; Moqsud et al., 2013; Sikder & Rahman, 2023).

El puente salino fue preparado con una solución de cloruro de potasio (1,00 mol/L) y agar – agar (2 %) (Sikder & Rahman, 2023) y la membrana de celofán no recibió ningún tratamiento adicional, las dos membranas de intercambio fueron soportadas en un neplo de polipropileno de ½ pulgada (Logroño et al., 2017).

Operación de las pilas de combustible microbiano

Armadas las PCMs como se muestra en la Figura 2A y 2B, con sus respectivos electrodos y sustratos, la operación inició con un burbujeo en la cámara anódica con dióxido de carbono (CO₂, Linde ®, Ecuador) por 10 min para lograr una atmósfera anaerobia además, se sellaron todos los orificios de la cámara anódica con pega de silicona (Rea Santiago et al., 2021). En la cámara catódica de la PCM tipo H se colocó el sistema

de aireación sumergiendo una manguera de 0,1 cm de diámetro acoplada a una bomba de aire tipo pecera (Boyu ®, México) (Arboleda Avilés et al., 2019). Los electrodos del ánodo y cátodo se conectaron en un tablero con orificios interconectados (protoboard) para tener una mayor estabilidad en el monitoreo con un multímetro (UNIT-T ®, China) durante seis días, el muestreo de la solución anódica se realizó cada dos días para sus respectivos análisis.

Influencia del diseño en la producción bioenergía y tratamiento de aguas residual de la industria textil

Para determinar la influencia del diseño en la producción de bioenergía se determinó los siguientes parámetros: diferencia de potencial a circuito abierto (CA) y diferencia de potencial a circuito cerrado (CC) medido con un multímetro (UNIT-T ®, China), resistencia interna (R_{int}) determina con curvas de polarización, mientras que la intensidad de corriente (I) se calculó con la ley de Ohm con la Ec 1, la densidad de potencia (DP)

se calculó con la Ec 2 y la eficiencia coulombica (% EC) se determinó con la Ec 3 (Rea Santiago et al., 2021; Sikder & Rahman, 2023).

$$I = \frac{CC}{R_{int}} \quad (1)$$

Donde: I es la intensidad de corriente; CC es el potencial a circuito cerrado; R es la resistencia eléctrica

$$D_p = \frac{CC \times I}{A_G} \quad (2)$$

Donde: D_p es la densidad de potencia; CC es la diferencia de potencial a circuito cerrado; I es la intensidad de corriente; A_g es el área geométrica del electrodo.

$$\%EC = \frac{M \int I dt}{\Delta DQO F V b} \times 100 \quad (3)$$

Donde: M es la masa molar de oxígeno en g/mol, ΔDQO es la variación de la demanda química de oxígeno en g/L, F es la constante de Faraday de 96485 C/mol, V es el volumen total del sustrato anódico en L y b es el número de electrones que transfiere un mol de oxígeno ($b=4$).

Para determinar la influencia del diseño en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil se midió el porcentaje de remoción de color (% RC) con un espectrofotómetro SP-2100VPC UV- Vis (Fisher Scientific®, España) realizando un barrido espectrofotométrico entre 350 nm y 700 nm, posteriormente se realizó una integración defina para finalmente calcular el % RC con la Ec 4 (Bahamonde Soria et al., 2022), además se midió el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) (% R_{DQO}) con el método APHA 5220 utilizando un espectrofotómetro (HACH®, Alemania) y se calculó el % R_{DQO} con la Ec 5 (Sikder & Rahman, 2023).

$$\%RC = \frac{(A_{ti} - A_{tf})}{A_{ti}} \times 100 \quad (4)$$

Donde: A_{ti} es el área bajo la curva en tiempo inicial; A_{tf} es el área bajo la curva en tiempo final.

$$\%R_{DQOM} = \frac{(DQO_{Mi} - DQO_{Mf})}{DQO_{Mi}} \times 100 \quad (5)$$

Donde: DQO_{Mi} es la DQO de la muestra de la cámara anódica inicial; DQO_{Mf} es la DQO de la muestra de la cámara anódica final.

Análisis estadístico

Para determinar la normalidad de los datos se utilizó para cada parámetro el análisis de supuestos con el estadístico W de Shapiro-Wilk y para verificar la varianza se utilizó el estadístico Levene`s, estadísticos que permiten determinar la factibilidad del análisis de varianza (ANOVA). También, para determinar la influencia del tipo de membrana y el tamaño de electrodo en la PCM tipo H se realizó un ANOVA multifactorial, con dos factores (tamaño del electrodo, membrana de intercambio), dos niveles y tres repeticiones, aplicando el estadístico P para su análisis. La influencia del tamaño del electrodo en PCMs de una cámara se realizó

con el ANOVA simple, con un nivel y con tres repeticiones, aplicando el estadístico P, con el siguiente criterio si $P < 0,05$ el factor tiene un efecto sobre el resultado obtenido con un nivel de confianza del 95,0 %.

Para establecer una diferencia estadística entre las PCM se realizó una prueba de comparación utilizando el método de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) con un nivel de significancia del 0,05 (95 % de confianza).

Todos los análisis estadísticos se procesaron con el software Statgraphics centurión (versión 16.1.18, StatPoint Technologies, USA).

RESULTADOS

Para caracterizar la corriente en función del potencial se realizó el análisis con las curvas de polarización que se muestra en la Figura 4 y que permiten obtener los resultados de la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros determinados con las curvas de polarización

Diseño	Resistencia interna (Ω)	Densidad de potencia máxima ($mW\ m^{-2}$)
T8	10000 \pm 0	6,40 \pm 0,79
T9	10000 \pm 0	10,75 \pm 1.04
T10	3167 \pm 1756	9,33 \pm 7,77
T11	55000 \pm 0	11,27 \pm 0,64
T12	28333 \pm 23094	4,28 \pm 4,17
T13	2833 \pm 1893	0,52 \pm 0,35

Influencia del diseño en la producción bioenergía

Para PCMstipo H se determinó por medio del ANOVA multifactorial que el tamaño del electrodo tiene un efecto significativo en la intensidad de corriente (I) y en la eficiencia coulómbica proporciona valores máximos de $24,4 \pm 7,5 \mu\text{A}$ y $1,1 \pm 0,3 \%$ respectivamente, por otro lado, la membrana de intercambio también tiene un efecto significativo en la diferencia de potencial a circuito abierto (CA), diferencia de potencia a circuito cerrado (CC) e intensidad de corriente (I) con los que se obtuvo valores máximos de $863,0 \pm 17,0 \text{ mV}$ en CA y $394,3 \pm 11,3 \text{ mV}$ en CC como se muestra en la Figura 6A y 6B además, se determinó estadísticamente como se muestra en la Tabla 3 que el factor

tamaño de electrodo no tiene un efecto significativo sobre la CC, CA y DP y el factor membrana de intercambio tampoco tiene un efecto significativo sobre la densidad de potencia eléctrica (DP), sin embargo se logra obtener valores máximos de $11,27 \pm 0,64 \text{ mW m}^{-2}$.

Analizando las interacciones entre factores se obtuvo una diferencia significativa como se muestra en la Tabla 3 con los valores de P, es decir, cada factor influye de diferente manera en CC (mejor resultado T11), CA (mejor resultado T11) y I (mejor resultado T10), mientras que en la interacción de factores para D_p y % EC no muestran una diferencia significativa, es decir los factores se comportan de la misma manera

Tabla 3. Resultados de ANOVA MULTIFACTORIAL para la pila de combustible microbiano (PCM) tipo H en la producción de bioenergía

Factores	Valor-P				
	(P<0,05; 95 % el factor tiene efecto significativo)				
	CA	CC	I	D_p	% EC
Tamaño del electrodo	0,5899	0,2073	0,035	0,4718	0,035
Membrana	0,0001	0,0000	0,0305	0,2044	1,0000
Interacción	0,0034	0,0001	0,0009	0,6114	0,2631

Tabla 4. Resultados de ANOVA SIMPLE para PCM de una cámara en la producción de bioenergía

Parámetros	Valor-P ($P < 0,05$; 95% el factor tiene efecto significativo)
	Tamaño del electrodo
CA	0,0081
CC	0,0690
I	0,3320
D_p	---
EC	0,1012

Para PCMs de una cámara se determinó por medio del ANOVA simple que el factor tamaño de electrodo tiene un efecto significativo en la producción de bioenergía dando como resultados el estadístico P como se muestra en la Tabla 4, que nos indica que el tamaño del electrodo tiene un efecto significativo para la variación del potencial a circuito abierto (CA), mientras que para la variación de voltaje a circuito cerrado (CC), intensidad de corriente (I), densidad de potencia (D_p) y eficiencia coulombica (EC) el tamaño del electrodo no tiene

un efecto significativo. Los valores máximos obtenidos fueron de 530 ± 32 mV en CA, $148,8 \pm 82,7$ mV en CC con electrodo pequeño como se muestra en la Figura 6A y 6B, para la I se obtuvo un valor máximo de $10,2 \pm 2,9$ μ A con un electrodo grande como se muestra en la Figura 6C y para el % EC se obtuvo un valor máximo de $0,3 \pm 0,2$ %.

Los resultados del método de diferencia mínima significativa de Fisher muestran grupos de los diseños con y sin diferencia significativa, es decir si son sin diferencia significativa son diseños que presentan resultados similares como se observan en la Figura 5. La Figura 5 A muestra tres grupos sin diferencia significativa para el CA, mientras que la Figura 5B muestra cuatro grupos sin diferencia significativa en el CC, además la Figura 5C muestra seis grupos sin diferencia significativa en la I, la Figura 5D muestra 11 grupos sin diferencia significativa de la D_p y la Figura 5E muestra seis grupos sin diferencia significativa en el % EC.

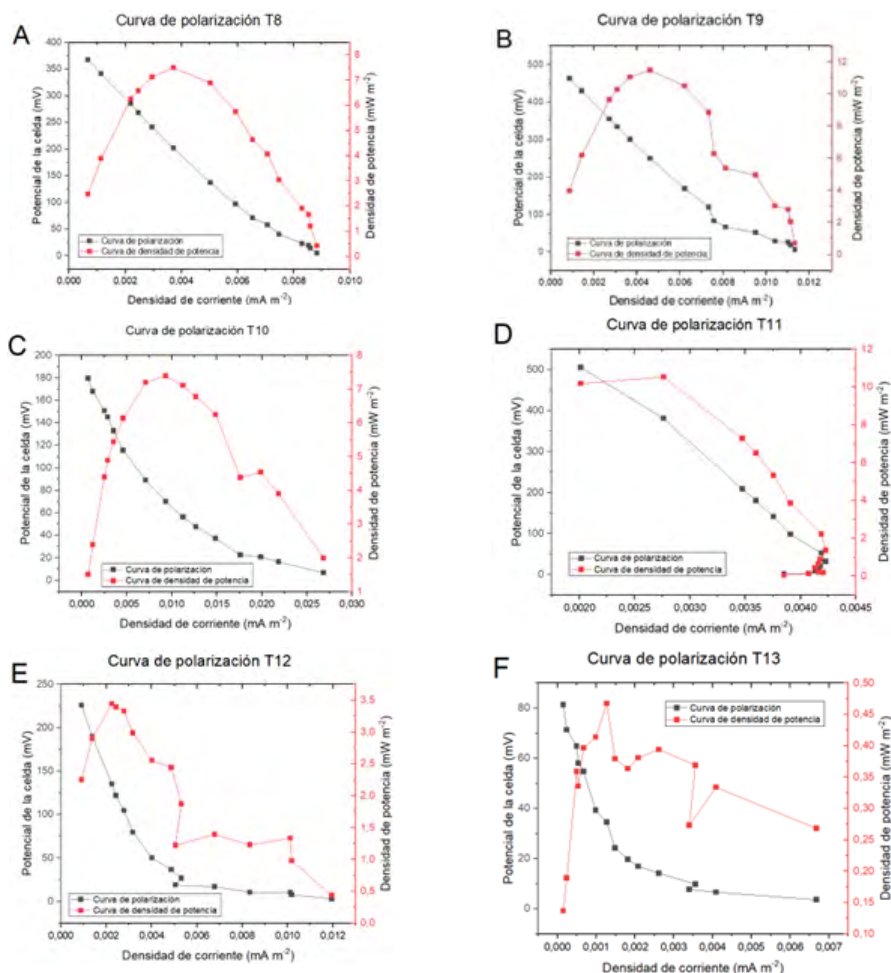


Figura 4. Curvas de polarización y densidad de potencia por cada tratamiento ~Diseño 8, PCM tipo H con membrana de puente salino y electrodo del ánodo de 5,44 cm² de área. B) Diseño 9, PCM tipo H con membrana de celofán y electrodo del ánodo de 5,44 cm² de área. C) Diseño 10, PCM tipo H con membrana de puente salino y electrodo del ánodo de 2,51 cm² de área. D) Diseño 11, PCM tipo H con membrana de celofán y electrodo del ánodo de 2,51 cm² de área. E) Diseño 12, PCM de cámara única con membrana de celofán y electrodo del ánodo de 2,51 cm² de área. F) Diseño 13, PCM de cámara única con membrana de celofán y electrodo del ánodo de 5,44 cm² de área

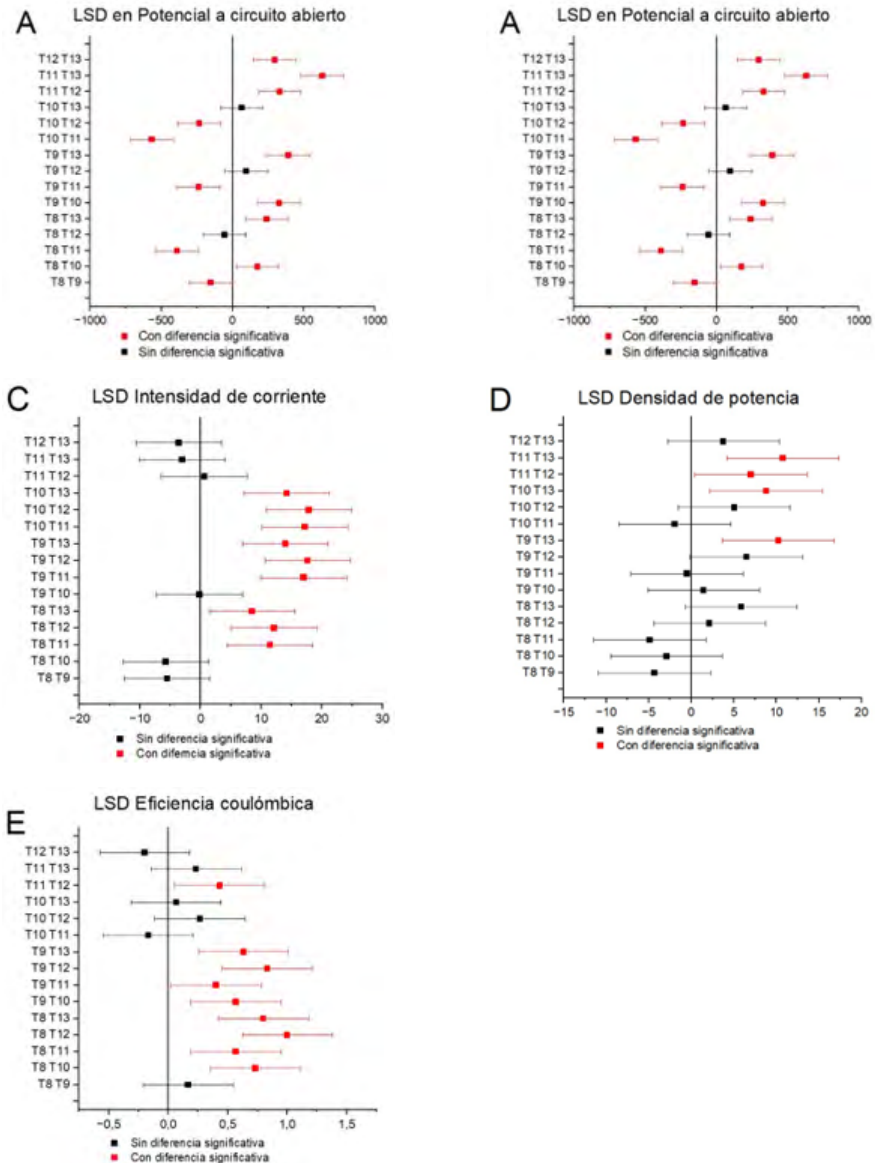


Figura 5. Análisis comparativo con el método estadístico de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) en las PCMs A) LSD del CA en los seis diseños. B) LSD del CC en los seis diseños. C) LSD de la I en los seis diseños. D) LSD de la DP en los seis diseños. E) LSD de la EC en los seis diseños

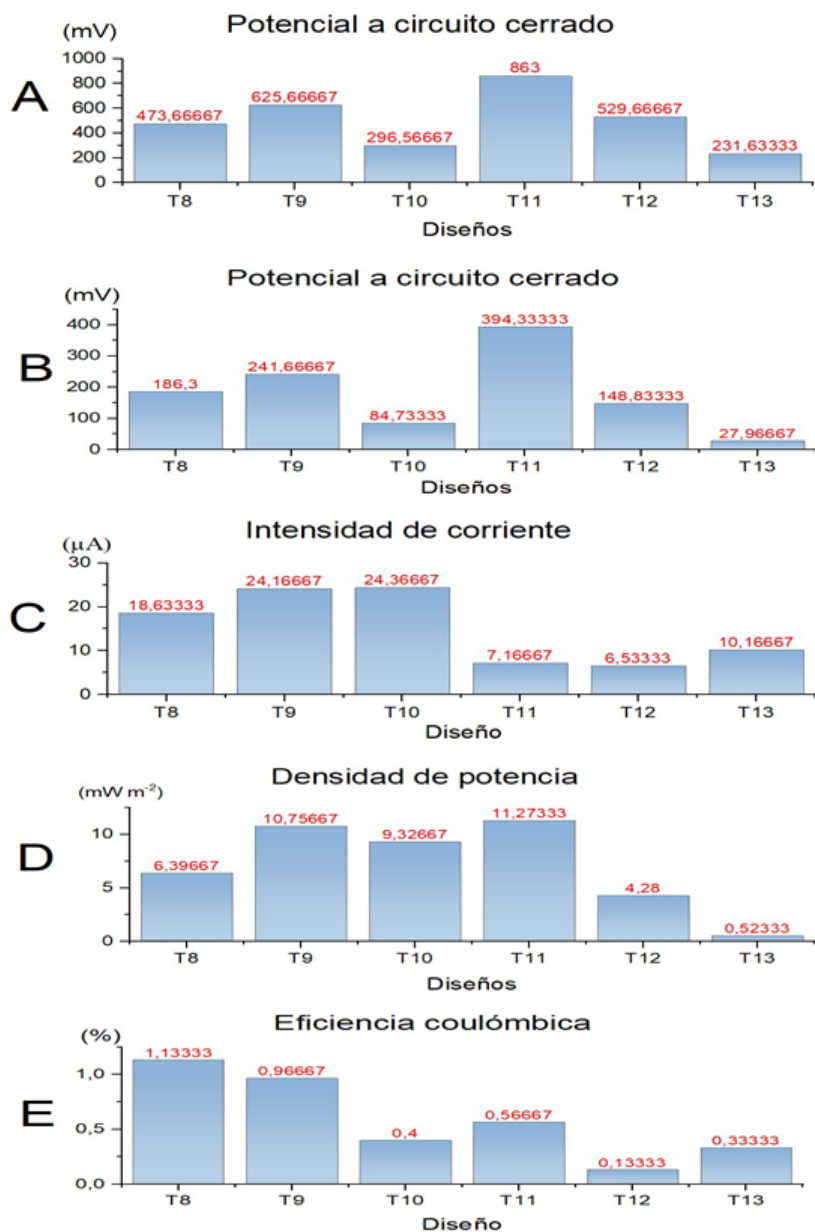


Figura 6. Parámetros que determina eficiencia de PCMs en la producción de bioenergía A) Potencia a circuito abierto B) Potencial a circuito cerrado C) Intensidad de corriente D) Densidad de potencia E) Eficiencia coulombica

Influencia del diseño en el tratamiento de aguas residual de la industria textil

Para establecer la influencia del diseño en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil se analizó el factor tamaño del electrodo y el tipo de membrana con el porcentaje de remoción de color (% RC) y el porcentaje de remoción de DQO (% RDQO).

La remoción de color se determinó con un barrido espectrofotométrico UV-Vis que refleja un decaimiento del color

en un periodo de seis días como se muestra en la Figura 7A que es un ejemplo representativo de los diseños investigados

Tabla 5. Resultados de ANOVA para PCM tipo H en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil

Factores	Valor-P (P<0,05; 95% el factor tiene efecto significativo)	
	% RC	% R _{DQO}
Tamaño del electrodo	0,0313	0,0100
Membrana	0,0093	0,0001
Interacción	0,0008	0,1087

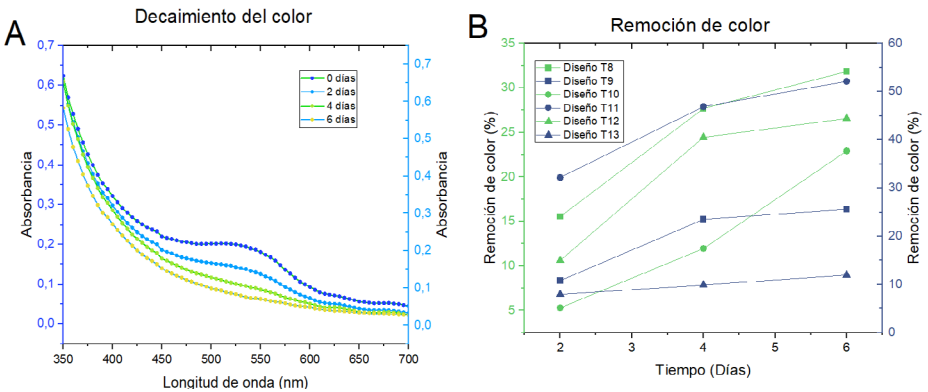


Figura 7. Remoción de color A. Barrido espectrofotométrico de absorbancia vs longitud de onda en el diseño T8.1 B. Porcentaje de remoción de color en un periodo de 6 días

El criterio estadístico para establecer la influencia del diseño en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil fue el estadístico P descrito anteriormente, se obtuvo los resultados que se muestran en la Tabla 5 e indican que el tamaño del electrodo y la membrana tiene

un efecto significativo en el % RC y % R_{DQO} . Los valores máximos obtenidos fueron de $52,5 \pm 4,5$ % en el % RC con una PCM tipo H con celofán y electrodo pequeño y 75 ± 6 % en el % R_{DQO} con una PCM de una cámara con electrodo grande como se muestra en la Figura 9A y 9B.

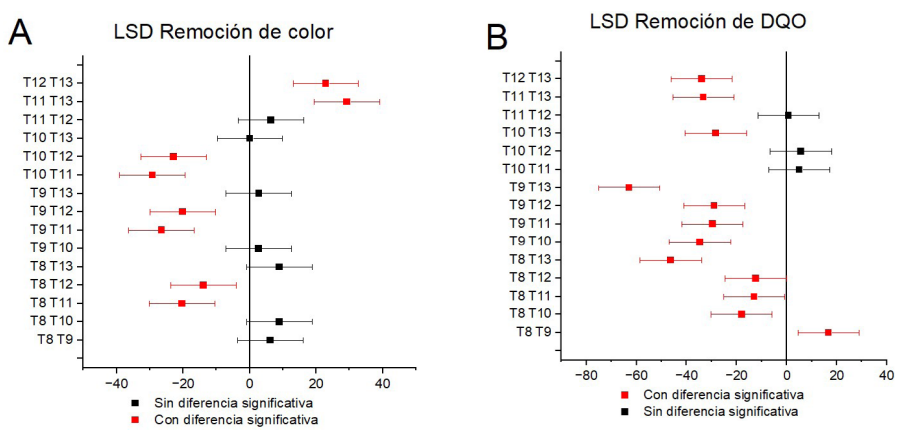


Figura 8. Análisis comparativo con el método estadístico de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) A) LSD del % RC en los seis diseños B) LSD del % RDQO en los seis diseños





Figura 9. Parámetros que determina eficiencia de PCMs en el tratamiento de aguas residuales A) Potencia a circuito abierto B) Potencial a circuito cerrado

Al analizar la interacción entre factores se obtuvo una diferencia significativa, es decir cada factor influye de diferente manera en el % RC (mejor resultado T11), mientras que la interacción entre los factores para el % R_{DQO} no muestra

una diferencia significativa, es decir los factores influyen de la misma manera.

Al realizar el análisis comparativo de los diseños con el método

estadístico de mínima significativa de Fisher (LSD) encontramos que en el % RC forma 7 grupos sin diferencia significativa como se muestra en la Figura 8 A y el valor máximo del % RC es de 52.5 ± 4.5 % del diseño T11 como se observa en la Figura 9A. Para el % R_{DQO} se observa en la Figura 8B la formación de tres grupos sin diferencia significativa y el valor máximo del % R_{DQO} es de 75 ± 6 % del diseño T13 como se observa en la Figura 9B.

DISCUSIÓN

Las curvas de polarización nos indican que en el primer segmento hay una caída de voltaje caracterizado por pérdidas por activación de las reacciones electroquímicas en el electrodo,

el segundo segmento tienen una caída del potencial causado por la resistencias iónica en el electrolito, los electrodos además depende del material y la arquitectura de las pilas por ello es que cada pila

presenta un comportamiento distinto ya que cada una presenta diferente configuración, el tercer segmento presenta pérdidas relacionadas al transporte de masa que dependen en gran medida de la densidad de corriente, la actividad del reactivo y la estructura del electrodo, esto hace que la velocidad de reacción se limite (Serra et al., 2020; Zhao & Chen, 2018).

La producción de bioenergía caracterizada con la I, CC, CA, DP y EC se ve afectada por un lado con la resistencia interna del sistema que influye en la I de una manera inversa por la ley de Ohm siendo estos valores menores a los reportados en estudios anteriores (0,2–0,3 mA) (Rathour et al., 2019b), por otro lado, los colorantes de las aguas residuales tipo azoicos compiten con la generación de energía, ya que estos necesitan electrones para degradar sus cadenas (Gupta et al., 2020; Sikder & Rahman, 2023).

Además, la densidad de potencia (DP) debería cambiar en función del área del electrodo ya que es

inversamente proporcional sin embargo estadísticamente no hay una diferencia significativa, es decir en los diseños estudiados al tener diferente área del electrodo del ánodo no afectan a los valores de DP sin embargo, se debe tomar en cuenta que áreas pequeñas aumentan la resistencia interna (Gupta et al., 2020; Rea Santiago et al., 2021).

Por otro lado, los valores de eficiencia coulombica menores a 1,4 % según la Figura 3E se deben a la presencia de enlaces mono, di y poliazocicos ya que estos se vuelven más electrofílicos para la biodegradación (Gupta et al., 2020) afectando a la cantidad de energía que se obtiene de la PCM. Con relación a la DP el valor máximo obtenido es de $11,27 \pm 0,64 \text{ mW m}^{-2}$ mejorando a los reportados en otros estudios que van desde 2,25 y $6,46 \text{ mW m}^{-2}$ respectivamente (Logroño et al., 2017; Moqsud et al., 2013; Sikder & Rahman, 2023).

El tratamiento del agua residual de la industria textil obtuvo valores menores a los reportados

(% RC entre 42 y 92 % y % RDQO entre 60 y 100 %), sin embargo se sabe que la decoloración y la degradación depende de factores

como la concentración y el tipo de colorante, ya que pueden afectar a la actividad catalítica de la biopelícula (Gupta et al., 2020).

CONCLUSIÓN

El análisis permitió determinar que, en las PCMs tipo H, la producción de bioenergía se ve afectada significativamente por el tipo de membrana y por el área del electrodo; sin embargo, su afectación no es homogénea, debido a que el tipo de membrana influye en parámetros como el CC, CA e I, y el tamaño del electrodo influye en los parámetros como la I y EC. Si nos referimos al tratamiento del agua residual, tanto el tipo de membrana y el área del electrodo tienen un efecto

significativo en los parámetros como el porcentaje de RC y RDQO. Por otro lado, en otras PCMs, se determinó que el tamaño del electrodo tiene un efecto significativo en la producción de bioenergía con el parámetro CA y el mismo efecto se tienen en el tratamiento del agua residual con los parámetros del porcentaje de RC y RDQO; además, se pudo establecer que los colorantes de las aguas residuales son de tipo azoicos y compiten con la generación de energía.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Central del Ecuador en especial al Laboratorio de investigación de Energía

Renovable y al Centro de Química, que permitieron realizar la investigación.

LISTA DE REFERENCIAS

- Arboleda Avilés, D. G., Núñez Barrionuevo, O. F., Sánchez Olmedo, O. F., Chinchin Piñan, B. D., Arboleda Briones, D. A., & Bahamonde Soria, R. A. (2019). Application of a direct current circuit to pick up and to store bioelectricity produced by microbial fuel cells. *Revista Colombiana de Química*, 48(3), 26–35. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n3.77011>
- Bahamonde Soria, R., Chinchin, B. D., Arboleda, D., Zhao, Y., Bonilla, P., Van der Bruggen, B., & Luis, P. (2022). Effect of the bio-inspired modification of low-cost membranes with TiO₂:ZnO as microbial fuel cell membranes. *Chemosphere*, 291, 132840. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132840>
- Duche Y., X., & Bahamonde S., R. (2021). Avances en el tratamiento de aguas residuales alimenticias para la producción de bioenergía en celdas de combustible microbianas: una revisión. *InfoANALÍTICA*, 10–51. <https://doi.org/10.26807/ia.vi.193>
- Gupta, S., Mittal, Y., Tamta, P., Srivastava, P., & Yadav, A. K. (2020). Textile wastewater treatment using microbial fuel cell and coupled technology: a green approach for detoxification and bioelectricity generation. *Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment*, 73–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817493-7.00004-7>
- Li, M., Zhou, M., Tian, X., Tan, C., McDaniel, C. T., Hassett, D. J., & Cu, T. (2018). Microbial fuel cell (MFC) power performance improvement through enhanced microbial electrogenicity. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1316–1327. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2018.04.010>
- Logan, B. E. (2008). Microbial fuel cells. In *John Wiley & Sons, Inc.*,

Hoboken, New Jersey. (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Logroño, W., Pérez, M., Urquiza, G., Kadier, A., Echeverría, M., Recalde, C., & Rákhely, G. (2017). Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater. *Chemosphere*, 176, 378–388. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.02.099>
- Moqsud, M. A., Omine, K., Yasufuku, N., Hyodo, M., & Nakata, Y. (2013). Microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation from organic wastes. *Waste Management*, 33(11), 2465–2469. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.07.026>
- Patel, D., Bapodra, S. L., Madamwar, D., & Desai, C. (2021a). Electroactive bacterial community augmentation enhances the performance of a pilot scale constructed wetland microbial fuel cell for treatment of textile dye wastewater. *Bioresource Technology*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125088>
- Patel, D., Bapodra, S. L., Madamwar, D., & Desai, C. (2021b). Electroactive bacterial community augmentation enhances the performance of a pilot scale constructed wetland microbial fuel cell for treatment of textile dye wastewater. *Bioresource Technology*, 332, 125088. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125088>
- Rathour, R., Patel, D., Shaikh, S., & Desai, C. (2019a). Eco-electrogenic treatment of dyestuff wastewater using constructed wetland-microbial fuel cell system with an evaluation of electrode-enriched microbial community structures. *Bioresource Technology*, 285, 121349. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121349>
- Rathour, R., Patel, D., Shaikh, S., & Desai, C. (2019b). Eco-electrogenic treatment of dyestuff wastewater using constructed wetland-

microbial fuel cell system with an evaluation of electrode-enriched microbial community structures. *Bioresource Technology*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121349>

Rea Santiago, Bahamonde S., R., Zurita Daniel, & Cevallos Carlos. (2021). Construcción y evaluación de una celda de combustible microbiana con materiales de bajo costo. *InfoANALÍTICA*, 91–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.26807/ia.vi.191>

Sánchez, M. , F. L. , & Z. I. , & E.-M. P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Novasinerгия Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 4(1), 164–180. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>

Serra, P. M. D., Espírito-Santo, A., & Magrinho, M. (2020). A steady-state electrical model of a microbial fuel cell through multiple-cycle polarization curves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109439. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109439>

Sikder, S., & Rahman, M. M. (2023). Efficiency of microbial fuel cell in wastewater (municipal, textile and tannery) treatment and bioelectricity production. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100421. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2023.100421>

Sonu, K., Syed, Z., & Sogani, M. (2020). Up-scaling microbial fuel cell systems for the treatment of real textile dye wastewater and bioelectricity recovery. *International Journal of Environmental Studies*, 77(4), 692–702. <https://doi.org/10.1080/00207233.2020.1736438>

Zhao, W., & Chen, S. (2018). Critical parameters selection in *polarization behavior analysis* of microbial fuel cells. *Bioresource Technology Reports*, 3, 185–190. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2018.07.010>