

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



Grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano utilizados como ánodos en celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales municipales

Por:

**ATHZIRI YULEN MAYORGA JAEN**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

Grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano utilizados como ánodos en celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales municipales

Por:

**ATHZIRI YULEN MAYORGA JAEN**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Asesor Principal Interno



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza

Asesor Principal Externo



Dra. Silvia Yudith-Martínez Amador

Coasesor



M.C. Laura María González Méndez

Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre de 2025

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

## DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano utilizados como ánodos en celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales municipales

Por:

**ATHZIRI YULEN MAYORGA JAEN**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobada por el jurado examinador:

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Presidente

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Vocal

  
M.C. Laura María González Méndez

  
Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza  
Vocal suplente



  
M.C. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México.

Diciembre de 2025

## DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hace referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización medio público o privado.

Autor principal



Athziri Yulen Mayorga Jaen

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

## DEDICATORIA

A Dios ya que tu amor, sabiduría y fuerza me acompañaron para concluir mi carrera profesional.

A mis padres Valentina Jaen Gaspar y Gonzalo Raciél Mayorga Hernández, gracias por el apoyo incondicional, por brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta, por su amor y paciencia que han depositado en mí. Los amo profundamente.

A mis hermanos, José Antonio y Denimahetsi por su compañía y palabras de aliento, gracias por ser parte de este logro, los quiero mucho.

A mis amigos, Azael, Leonardo y Brayan, los mejores momentos los compartí con ustedes, gracias por su apoyo, cariño y tiempo, su amistad fue uno de los mejores regalos.

A Sandra a quien siempre voy a considerar parte de mi familia, gracias por alentarme a seguir adelante, por las largas platicas, por tus consejos y apoyo emocional.

A mi tía Maura, primo Uriel y demás familia que me apoyaron en esta travesía, gracias por sus palabras de aliento fueron parte importante para lograr esta meta.

A mi amiga Renata por mostrarme la universidad, por sus consejos y ayuda brindada en este trayecto.

A mi amiga Mariana por su amistad sincera, por confiar en mí y apoyarme.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, quiero expresar mi profunda gratitud por abrirme las puertas y brindarme las herramientas para mi formación profesional.

Al Dr. Pedro Pérez Rodríguez, por compartir sus conocimientos y guiarme durante el desarrollo de esta tesis, por su comprensión y paciencia.

Al Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza, cuya orientación y asesoramiento externo fueron de gran ayuda.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, por su valiosa orientación, su paciencia, tiempo y disposición en la realización de esta investigación.

Al M.C. Laura María González Méndez, por su valiosa colaboración en la realización de mi tesis.

A los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos, y me inspiraron a seguir aprendiendo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS .....	6
RESUMEN .....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
OBJETIVO GENERAL.....	14
Objetivos específicos.....	14
HIPÓTESIS .....	15
CAPÍTULO I .....	16
REVISIÓN DE LITERATURA .....	16
1.1    Introducción al tratamiento de aguas residuales .....	16
1.1.1    Problemática de las aguas residuales y su impacto ambiental.....	16
1.1.2    Procesos convencionales de tratamiento fisicoquímico y biológico.....	17
1.1.3    Limitaciones de las tecnologías actuales y necesidad de alternativas sostenibles.....	18
1.2    Celdas de combustible microbianas (CCM) .....	18
1.2.1    Principio de funcionamiento de una celda de combustible microbiana	18
1.2.2    Tipos de CCM.....	19
1.2.3    Microorganismos exoelectrógenos: mecanismos de transferencia de electrones .....	19
1.3    El ánodo en las celdas de combustible microbianas.....	21
1.3.1    Propiedades deseables .....	21
1.3.2    Materiales más comunes para ánodos.....	22
1.3.2.1    Grafito.....	22
1.3.2.2    Carbón Activado.....	23
1.3.2.3    Nanomateriales de carbono .....	23
1.4    Aplicaciones y perspectivas de las CCM en el tratamiento de aguas residuales.....	24
1.4.1    Eficiencia en la remoción de materia orgánica .....	24
1.4.2    Generación de energía y recuperación de recursos.....	25
1.4.3    Escalabilidad y retos tecnológicos.....	25
1.4.4    Integración con otros sistemas de tratamiento .....	26

CAPÍTULO II .....	27
MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
2.1 Materiales .....	27
2.2 Preparación de compuestos de PU/grafito y PU/CNF .....	27
2.3 Construcción y operación de las CCM .....	28
2.4 Caracterización electroquímica de las CCM .....	30
CAPÍTULO III .....	31
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	31
3.1. Voltaje .....	31
3.2. Densidad de potencia .....	32
3.3. Eficiencia coulombica.....	33
3.4. Eficiencia de remoción de la DQO en las CCM.....	34
CONCLUSIÓN .....	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de las CCM que se utilizaron en este estudio.....	30
<b>Figura 2.</b> Voltaje generado en las CCM empacadas con compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% como ánodos.....	31
<b>Figura 3.</b> Densidad de potencia generada en las CCM empacadas con compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% como ánodos.....	32
<b>Figura 4.</b> Eficiencia coulombica obtenida en las CCM.....	33
<b>Figura 5.</b> Eficiencia de remoción de la DQO en las CCM.....	34

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Análisis fisicoquímico del agua residual municipal cruda.....	28
---	----

## RESUMEN

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos capaces de convertir la energía bioquímica disponible en la materia orgánica en energía eléctrica mediante el metabolismo microbiano. En este trabajo, compósitos de grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano fueron sintetizados y utilizados como ánodos en celdas de combustible microbianas de doble compartimento para el tratamiento de aguas residuales municipales, evaluando la generación de energía eléctrica y la remoción de materia orgánica. El voltaje, densidad de potencia volumétrica, eficiencia coulombica y eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) obtenidos en las CCM empacadas con los compósitos de poliuretano (PU), poliuretano y nanofibras de carbono al 1% (PU/CNF 1%), y poliuretano y grafito al 1% (PU/Grafito 1%) fueron de 188.45 mV, 301.3 mV y 288.06 mV, 35.51 mW/m<sup>3</sup>, 90.78 mW/m<sup>3</sup> y 82.98 mW/m<sup>3</sup>, 1.73%, 4.41% y 2.66%, y 86.04%, 68.62% y 83.91%, respectivamente. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad de utilizar este tipo de materiales en CCM de doble compartimento para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía eléctrica.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda energética de México ha ido en aumento; la producción de energía a partir de combustibles fósiles ha provocado graves problemas ambientales a nivel mundial, siendo las emisiones de gases de efecto invernadero una de las principales causas del calentamiento global. Dado que estas fuentes de energía no son renovables, es necesario encontrar alternativas nuevas y más limpias para la producción de energía (Benavides *et al.*,2020). Una forma de abordar este desafío es utilizar las fuentes de energía renovables de forma racional y eficiente. Las celdas de combustible microbianas (CCM) son una tecnología prometedora que tiene el potencial de ayudar a resolver dos de los problemas más cruciales de la actualidad: la crisis energética y la escasez de agua potable (Revelo *et al.*, 2013). Una CCM es un dispositivo electroquímico que utiliza la actividad metabólica de microorganismos para oxidar la materia orgánica y generar una corriente eléctrica mediante la transferencia de electrones directa a los electrodos. Este tipo de celda permite generar electricidad a partir de aguas residuales, mientras se lleva a cabo su tratamiento biológico (García-Navarro *et al.*,2017).

El ánodo es uno de los componentes más cruciales de una celda de combustible microbiana (CCM), ya que proporciona la superficie necesaria para el crecimiento bacteriano. Estas bacterias producen electrones y protones y los transfieren al ánodo. Sin embargo, el desarrollo de materiales para ánodos adecuados sigue siendo un reto importante para mejorar el rendimiento de las CCM. Estos materiales deben poseer ciertas propiedades fundamentales, como buena biocompatibilidad, alta conductividad eléctrica, alta estabilidad química, buena estabilidad térmica y mecánica, y una gran superficie específica (Yaqoob *et al.*,2020).

Considerando la importancia de emplear tecnologías alternativas para producir energía eléctrica, esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de ánodos de grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano en

celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales municipales.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de ánodos de grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano en celdas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Objetivos específicos.

1. Sintetizar los ánodos de grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano.
2. Evaluar la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica de las celdas de combustible microbianas empacadas con los ánodos sintetizados durante el tratamiento de aguas residuales municipales.
3. Caracterizar electroquímicamente las celdas de combustible microbianas.

## **HIPÓTESIS**

El uso de ánodos de grafito y nanofibras de carbono incrustados en una matriz de poliuretano incrementara la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas.

# CAPÍTULO I

## REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1 Introducción al tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales tienen su origen en actividades domésticas, institucionales, comerciales e industriales, y con frecuencia se combinan con aguas pluviales, aguas subterráneas o superficiales. Cuando estos efluentes son descargados sin un tratamiento previo en cuerpos hídricos, generan impactos adversos tanto en la salud pública como en el equilibrio ambiental. Entre dichos efectos se incluyen la emisión de olores desagradables, la reducción de los niveles de oxígeno disuelto y la liberación de nutrientes, compuestos tóxicos y agentes patógenos (López-Vázquez *et al.*, 2017).

Es necesario tratar las aguas residuales mediante métodos físicos, químicos o biológicos para minimizar el impacto potencial de su descarga y promover la recuperación de productos valiosos como agua, nutrientes y biosólidos. El tratamiento de aguas residuales se puede lograr combinando diversos métodos físicos (por ejemplo, cribado, sedimentación y filtración), químicos (como la coagulación y oxidación), térmicos (por ejemplo, secado, incineración) y biológicos (en sistemas de biomasa suspendida o fija) (López-Vázquez *et al.*, 2017).

#### 1.1.1 Problemática de las aguas residuales y su impacto ambiental

En los últimos años, el mundo se ha centrado cada vez más en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, comerciales e industriales, y han buscado soluciones para ello. El vertido directo de aguas residuales sin tratar en corrientes de agua superficiales (ríos, lagos y océanos) provoca graves problemas ambientales y daña la flora y la fauna de los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, las aguas residuales deben tratarse adecuadamente antes de su descarga. El proceso de tratamiento

altera las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales, si no se lleva a cabo genera alteraciones en los ecosistemas. El nivel de tratamiento requerido debe adaptarse a las condiciones específicas del receptor desde el cual se descargan las aguas residuales (Huamán *et al.*,2022).

### 1.1.2 Procesos convencionales de tratamiento fisicoquímico y biológico

El tratamiento fisicoquímico tiene dos procesos convencionales los cuales son coagulación/floculación. La coagulación es el proceso de desestabilizar las partículas en suspensión para reducir las fuerzas de separación entre ellas, mientras que la floculación es el proceso que consiste en la aglomeración, esto es llevado a cabo por la agitación moderada del agua de las partículas que sufrieron una desestabilización durante la coagulación, y de esta manera se formen "flóculos" más grandes y de peso específico (Bernal-Martínez *et al.*, 2011). Los agentes químicos más empleados son aluminio, sales de hierro y polímeros (Patiño *et al.*, 2014).

El tratamiento biológico de las aguas residuales tiene como finalidad la degradación o adsorción de la materia disuelta, coloidal y sedimentable mediante flóculos biológicos o biopelículas, así como la eliminación de compuestos solubles, entre los que se incluyen materia orgánica biodegradable y no biodegradable (algunos pueden presentar toxicidad) y nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo (López-Vázquez *et al.*, 2017).

El tratamiento biológico de aguas residuales se basa en la función natural de las bacterias para cerrar los ciclos de nutrientes (por ejemplo, los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo) en el suelo. Las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan bacterias presentes de forma natural en el medio ambiente. La ingeniería de sistemas busca recrear las condiciones naturales necesarias para la bioconversión, como la aireación y el contenido de biomasa requerido. Además, el diseño de bioprocesos se fundamenta en la creación y utilización de nichos ecológicos para seleccionar los microorganismos mejor adaptados y capaces de proliferar en dichas condiciones ambientales (López-Vázquez *et al.*, 2017).

### 1.1.3 Limitaciones de las tecnologías actuales y necesidad de alternativas sostenibles

Uno de los mayores retos de la tecnología de tratamiento de aguas residuales es la mejora de los sistemas existentes o el desarrollo de sistemas nuevos, más sostenibles y eficientes que proporcionen agua tratada apta para su reutilización o vertido a la naturaleza sin impacto ambiental. Esto cobra especial importancia en la sociedad actual, donde las sustancias presentes en la vida cotidiana son cada vez más complejas (Martínez Castillejo,2022).

## 1.2 Celdas de combustible microbianas (CCM)

Una celda de combustible microbiana (CCM) es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía bioquímica en energía eléctrica. Las bacterias obtienen la energía transfiriendo electrones desde un donador de electrones como el acetato o las aguas residuales (materia orgánica), hacia un aceptor de electrones como el oxígeno. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial entre el donador y el aceptor, más energía adquieren las bacterias y, por lo tanto, mayor es su tasa de reproducción, lo que resulta en una descomposición más rápida de la materia orgánica (Buitrón *et al.*,2011).

### 1.2.1 Principio de funcionamiento de una celda de combustible microbiana

En una CCM, las bacterias no transfieren electrones directamente a un aceptor final de electrones, sino a un electrodo, el ánodo. Los electrones fluyen a través de una resistencia u otra carga, hacia el cátodo, donde se capturan y se convierten directamente en energía eléctrica. Durante este proceso, el carbono orgánico se transforma en CO<sub>2</sub>. El ciclo se completa cuando los protones migran al cátodo en aerobiosis donde se combinan con el oxígeno para formar agua. La mejora en la eficiencia de la generación eléctrica y la eliminación de contaminantes se aborda mediante el estudio de especies con capacidad de transferir electrones, el diseño y los materiales de las celdas, la incorporación de mediadores químicos, membranas

de intercambiadoras de protones y la identificación de condiciones ambientales óptimas para la actividad microbiana. Por ejemplo, se ha determinado que géneros como *Geobacter*, *Shewanella* y *Clostridium* contienen especies activas electrogénicamente, aunque los consorcios microbianos o lodos parecen manifestar un rendimiento más destacado (Buitrón *et al.*,2011).

### 1.2.2 Tipos de CCM

Las CCM constan de dos cámaras. Una de ellas es anaeróbica y contiene el ánodo, donde se deposita el sustrato y los microorganismos. La otra es aeróbica y contiene el cátodo. Estas dos cámaras suelen estar separadas por una membrana de intercambio de protónico (MIP), que permite el paso selectivo de protones desde la cámara anódica a la catódica (Benavides *et al.*,2020). Se puede obtener una variante eliminando la cámara del cátodo y exponerlo directamente al aire, convirtiéndola así en una CCM de cámara única; este sistema resulta más sencillo y económico (Revelo *et al.*, 2013).

Existe un tipo menos común de celda de combustible microbiana (CCM) es una cámara sin membrana de intercambio de protones (MIP); en este sistema, al momento de airear el cátodo se complica la difusión del oxígeno disuelto hacia el ánodo,provocando afectaciones a la biopelícula (López-Alejo *et al.*,2021).

### 1.2.3 Microorganismos exoelectrógenos: mecanismos de transferencia de electrones

Las bacterias son un componente clave de las celdas de combustible microbianas (CCM). Sin embargo, no todas las bacterias son aptas para el funcionamiento de estas celdas. Para actuar como catalizadores de la oxidación de la materia orgánica en la región anódica, las bacterias deben poseer dos características:1) deben ser anaerobias o anaerobias facultativas; 2) deben ser capaces de utilizar directamente a un aceptor de electrones insoluble, o mediante moléculas llamadas acarreadores, que pueden transferir electrones al ánodo. Esto depende del mecanismo específico

de transferencia de electrones de cada bacteria. Las bacterias que pueden transferir electrones al ánodo sin sustancias externas (acarreadoras) se denominan bacterias anodofílicas, bacterias exoelectrógenas y/o bacterias electroquímicamente activas (Martínez-Castrejón *et al.*, 2020).

Actualmente se sabe que el mecanismo de transferencia de electrones de las bacterias al ánodo en las celdas de combustible microbianas (CCM) no es el mismo para todas sus especies. Se han descrito al menos cuatro mecanismos diferentes: i) por contacto directo; ii) a través de nanopilis o nanoalambres; iii) por medio de mediadores endógenos; y iv) a través de mediadores exógenos. En el primer mecanismo (contacto directo), la transferencia de electrones está asociada a proteínas celulares a nivel membrana; esto significa que la transferencia de electrones depende necesariamente de la interacción directa entre las bacterias y la superficie del ánodo. Normalmente, las bacterias se adhieren al material del ánodo y lo colonizan, lo que facilita el contacto entre las bacterias y este electrodo. Por otra parte, el segundo mecanismo involucra una biopelícula que se forma alrededor de bacterias y con pilis celulares los cuales se han denominado nanoalambres, su composición química les permite ser conductivos y puedan conducir electrones hacia al ánodo. El tercer mecanismo está relacionado con mediadores endógenos o compuestos reducidos producidos (también denominados acarreadores de electrones) desde el interior de las bacterias y con la capacidad oxidarse en el ánodo. Posteriormente, la molécula oxidada vuelve a integrarse a la célula, en el que nuevamente es reducida y se carga nuevamente de electrones que se liberan en el ánodo. Finalmente, el último mecanismo es similar al anterior. La diferencia radica en la ubicación de los acarreadores de electrones son suministrados al medio donde son tomados por las bacterias, a través de los cuales ceden los electrones y enseguida estas moléculas reducidas se oxidan en el ánodo. Este mecanismo utiliza acarreadores de electrones exógenos, como fenazinas, fenotiazinas, fenoxazinas y quinonas, así como otros componentes que facilitan la transferencia de electrones al ánodo (Martínez-Castrejón *et al.*,2020).

### 1.3 El ánodo en las celdas de combustible microbianas

El ánodo es uno de los componentes más importantes de una celda de combustible microbiana (CCM), ya que proporciona la superficie necesaria para el crecimiento bacteriano. Además y como se mencionó anteriormente, es el lugar donde las bacterias producen electrones y protones, que luego transfieren al ánodo. Sin embargo, el desarrollo de materiales adecuados para el ánodo sigue siendo un reto importante para mejorar el rendimiento de las celdas de combustible microbianas (Yaqoob *et al.*,2020).

#### 1.3.1 Propiedades deseables

Los materiales de los electrodos deben poseer una excelente área superficial, compatibilidad química, durabilidad, conductividad eléctrica, porosidad entre otras propiedades. Un alto flujo de electrones es crucial para el correcto funcionamiento de las celdas de combustible microbianas (CCM) (Banerjee *et al.*,2022).

- Área superficial: en las celdas de combustible microbianas (CCM), la producción de energía está influenciada principalmente por la superficie del ánodo. Las pérdidas óhmicas en las CCM dependen en gran medida de la resistencia interna del ánodo. El aumento del área superficial puede mejorar la cinética del electrodo al promover la actividad microbiana. La rugosidad superficial favorece la adhesión de la biopelícula. El aumento de la rugosidad de la superficie del ánodo incrementa el número de sitios activos, lo que promueve la adhesión microbiana (Banerjee *et al.*,2022).
- Compatibilidad química: los electrodos están expuestos directamente a la respiración bacteriana. El cobre, la plata, el oro y otros metales pueden utilizarse como ánodos, pero se corroen fácilmente en ambientes ácidos y, por lo tanto, son incompatibles con la actividad biológica (Banerjee *et al.*,2022).
- Durabilidad: la baja durabilidad y la insuficiente estabilidad mecánica de los materiales de ánodo convencionales pueden provocar expansión,

reduciendo así su vida útil. El contacto prolongado entre los materiales de ánodo y ambientes ácidos puede causar corrosión y expansión. La escasa estabilidad térmica, la baja resistencia mecánica y la corrosión química causada por altas concentraciones localizadas de iones  $H^+$  en los materiales de ánodo pueden provocar la expansión de dicho electrodo (Banerjee *et al.*,2022).

- Conductividad eléctrica: la selección del material del ánodo debe garantizar una baja resistencia al sustrato en la solución del electrolito anódico para lograr un flujo de electrones óptimo. El uso de materiales altamente conductores puede reducir la resistencia y la impedancia interfacial (Banerjee *et al.*,2022).
- Porosidad: la superficie porosa del ánodo puede potenciar la transformación biocatalítica de microorganismos. Esta superficie inmoviliza eficazmente los microorganismos, permitiendo así la transferencia directa de electrones. La porosidad reduce la pérdida óhmica y la resistencia interna. Una mayor porosidad incrementa indirectamente la superficie del ánodo, lo que favorece el crecimiento de bacterias y biopelículas (Banerjee *et al.*,2022).

### 1.3.2 Materiales más comunes para ánodos

Idealmente, los materiales de electrodo utilizados en las CCM deberían ser biocompatibles, conductores, porosos, fáciles de fabricar, económicos, reciclables y fácilmente escalables. Numerosos materiales de electrodo ya han sido probados para determinar su idoneidad como ánodos en las CCM. Estos materiales incluyen principalmente materiales a base de carbono (Kalathil *et al.*,2018).

#### 1.3.2.1 Grafito

El grafito es un alótropo del carbono que consiste en una monocapa atómica de carbono dispuesta en una estructura hexagonal, sus propiedades eléctricas, fisicoquímicas y estructurales lo convierten en un material ideal para su aplicación

en ánodo de las celdas de combustible microbianas (CCM) (Yazdi *et al.*,2016). Sin embargo, el grafito presenta numerosos inconvenientes, como su elevado costo y su limitada conductividad, lo que lo hace inadecuado para las necesidades energéticas comerciales actuales. Generalmente, los materiales de grafito utilizados como ánodos, tales como láminas, papel, varillas, partículas, tejidos y cepillos, son más eficientes que los materiales de carbono convencional en las celdas de combustible microbianas (CCM) (Abd-Elrahman *et al.*, 2022).

#### 1.3.2.2 Carbón Activado

El carbón activado granular (CAG) es un material económico y biocompatible, pero su baja conductividad eléctrica y alta porosidad restringen el flujo de electrones y reducen su rendimiento electroquímico. Por lo tanto, se requiere una mayor modificación de este material para mejorar su conductividad y reducir su porosidad (Abd-Elrahman *et al.*, 2022).

#### 1.3.2.3 Nanomateriales de carbono

Los nanotubos de carbono (NTC) son un material prometedor para electrodos y han sido utilizados como modificador de ánodo en CCM (Yazdi *et al.*,2016).

Por otra parte, el grafeno es más estable y duradero que el grafito, y posee mayor resistencia mecánica y diamagnetismo. Además, presenta alta conductividad eléctrica y biocompatibilidad, lo que lo convierte en un material anódico común en las celdas de combustible microbianas (CCM). Debido a estas propiedades, el grafeno ha sido objeto de numerosas investigaciones. Sin embargo, el elevado costo del grafeno disponible comercialmente ha generado una necesidad constante de alternativas más económicas (Banerjee *et al.*,2022).

Las nanofibras de carbono (CNF, por sus siglas en inglés) poseen un enorme potencial para su desarrollo como ánodos, especialmente ya que la tecnología de electrohilado ha cobrado relevancia. Las CNF también demuestran una buena estabilidad a largo plazo en solución (Abd-Elrahman *et al.*, 2022).

#### 1.4 Aplicaciones y perspectivas de las CCM en el tratamiento de aguas residuales

Las celdas de combustible microbianas (CCM) representan una tecnología en desarrollo con gran potencial para enfrentar dos desafíos clave de la sociedad contemporánea: la crisis energética y la escasez de agua limpia (Revelo *et al.*, 2013). Algunas aplicaciones de las CCM se describen a continuación:

- Las CCM permiten remover materia orgánica de aguas residuales al usarla como sustrato. Esto significa que, mientras los microorganismos degradan contaminantes, también generan electricidad (Revelo *et al.*, 2013).
- Son útiles en biorremediación, ya que los biocátodos pueden reducir compuestos tóxicos como metales pesados como el  $\text{Cr}^{+6}$  y el  $\text{U}^{+6}$ , solventes clorados o nitratos, transformándolos en formas menos dañinas para el ambiente (Revelo *et al.*, 2013).
- Representan una vía de generación alternativa de energía limpia, pues convierten biomasa abundante en electricidad con bajas emisiones de  $\text{CO}_2$  y sin necesidad de combustibles fósiles (Revelo *et al.*, 2013).

##### 1.4.1 Eficiencia en la remoción de materia orgánica

La eficiencia de eliminación de materia orgánica en las celdas de combustible microbianas (CCM) suele variar, según factores como el tipo de sustrato empleado, la composición de la comunidad microbiana y las condiciones de operación del sistema. Para evaluar este rendimiento se utilizan principalmente indicadores como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), que permiten comparar la concentración inicial y final de contaminantes en el agua residual. Además, se considera la eficiencia coulombica, la cual expresa la proporción entre la carga eléctrica realmente obtenida y la carga teórica disponible en el sustrato (Revelo *et al.*, 2013).

#### 1.4.2 Generación de energía y recuperación de recursos

Los sistemas bioelectroquímicos han evidenciado ser una estrategia emergente altamente eficiente, caracterizada por su viabilidad económica y sostenibilidad, especialmente en la generación de electricidad a partir de aguas residuales (Mohyudin *et al.*, 2022).

La recuperación de compuestos de alto valor ha sido objeto de investigación reciente en el ámbito de las celdas de combustible microbianas (CCM), dado que en estos sistemas pueden generarse productos como hidrógeno ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y diversos metales de interés, entre ellos plata (Ag) y cromo (Cr). Esta aplicación de las CCM se perfila como una estrategia capaz de incrementar la sostenibilidad del proceso, favoreciendo su implementación a gran escala (Munoz-Cupa *et al.*, 2021).

#### 1.4.3 Escalabilidad y retos tecnológicos

Los resultados en el laboratorio no siempre pueden trasladarse de forma confiable a sistemas de mayor tamaño. Esto se debe a variaciones en parámetros como el volumen del reactor, la superficie de los electrodos y la resistencia interna. Se destaca que las celdas más pequeñas tienden a generar una mayor densidad de potencia, lo que complica el diseño de dispositivos de gran escala (Toledo, 2022).

En cuanto a los retos tecnológicos, se identifican varios puntos críticos. Uno de los principales es el alto costo de los materiales, especialmente en el caso de los cátodos que requieren catalizadores como el platino, lo que restringe su aplicación masiva. A esto se suma la baja potencia eléctrica producida que, si bien convierte a las CCM en sistemas casi autosustentables, sigue siendo insuficiente para cubrir demandas industriales. Otro aspecto relevante es la resistencia interna elevada, la cual depende de la configuración empleada (simple o doble cámara) y de los materiales de la membrana y electrodos (Toledo, 2022).

La operación del sistema también representa un desafío, ya que mantener condiciones anaerobias en el ánodo y aerobias en el cátodo, junto con la estabilidad

de las membranas, resulta mucho más viable en entornos controlados de laboratorio que en plantas de tratamiento reales. Asimismo, la estabilidad de las biopelículas exoelectrógenas es un factor crítico, dado que no todas las especies microbianas conservan un rendimiento adecuado sin el uso de mediadores externos (Toledo, 2022).

#### 1.4.4 Integración con otros sistemas de tratamiento

La integración de un sistema de Celdas de Combustible Microbianas (CCM) con un sistema hidropónico (Hyp, por sus siglas en inglés) constituye una propuesta tecnológica emergente de gran relevancia. Esta sinergia permite abordar de manera simultánea tres procesos fundamentales: la eliminación de materia orgánica presente en aguas residuales, la generación de energía eléctrica a partir de la recuperación bioelectroquímica, y el aprovechamiento de nutrientes esenciales como fósforo (P) y nitrógeno (N) para el crecimiento vegetal. En consecuencia, esta estrategia no solo favorece la producción sostenible de alimentos, sino que también contribuye a la mejora integral de la calidad ambiental, posicionándose como una alternativa innovadora en el ámbito de la gestión de recursos hídricos y energéticos (Paucar *et al.*, 2022).

## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Materiales

La mezcla de uretanos y 4-4 disocianato de difenilmetano para la obtención de la espuma de poliuretano fueron adquiridos en Especialidades Químicas para el Poliéster, S.A. de C.V. Por su parte, las nanofibras de carbono (CNF, por sus siglas en inglés) fueron suministradas por Pyrograf Products, Inc., estas fueron tratadas térmicamente a 3000 °C para aumentar el grado de grafitización. Además, cuentan con un diámetro promedio de 100 nm, longitudes de 50 a 200 micras, área superficial de 41 m<sup>2</sup>/g y una pureza mayor al 95%. El grafito fue adquirido en Sigma-Aldrich, cuenta con diámetros superiores a las 20 micras y una pureza del 99%. El ácido sulfúrico (96 ~ 98%), dicromato de potasio (96 ~ 98%), sulfato de mercurio (> 98%), sulfato de plata (> 98%), y biftalato de potasio (> 99.95%), utilizados durante la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), fueron adquiridos en FERMONT. La membrana de intercambio catiónico utilizada en las CCM fue adquirida en Membranes International Inc. (CXM-200, espesor estándar 0.45 ± 0.025 mm).

#### 2.2 Preparación de compuestos de PU/grafito y PU/CNF

Para la fabricación de los polímeros espumados compuestos al 1% wt./wt. de grafito y 1% wt./wt. de CNF, 2.6 g de grafito y 2.6 g de nanofibras de carbono se dispersaron en 150 mL de poliol mediante agitación mecánica hasta su homogenización. Posteriormente, se añadieron 64 mL de disocianato a cada una de las muestras y se realizó un mezclado durante 60 segundos con un homogeneizador de doble aspa a 4000 rpm. Se dejó reposar el sistema ya

espumado durante 25 minutos. Finalmente, la espuma fue curada en un horno a 100 °C durante 4 h.

### 2.3 Construcción y operación de las CCM

La Fig. 1 muestra la configuración de las CCM utilizadas en los experimentos. Se utilizaron celdas de combustible microbianas de doble compartimento, de un volumen aproximado de 2000 mL (1000 mL cada compartimento), agregando una pieza de fieltro de grafito (10 × 10 × 0.8 cm) en el compartimiento catódico (cátodo) y 1000 mL de agua desionizada como solución catódica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimento anódico se colocó uno de los soportes previamente sintetizados (ánodo) (PU, PU/Grafito 1% y PU/CNF 1%), y 1000 mL de agua residual municipal cruda como sustrato (e inóculo) (las características fisicoquímicas del agua residual se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Análisis fisicoquímico del agua residual municipal cruda.

Parámetros	Agua residual municipal cruda
Color	Gris oscuro
Olor	Fuerte y penetrante
pH	9.24
Conductividad eléctrica	1.12 mS/cm
Demanda química de oxígeno	703.13 mg/L
Temperatura	24-27 °C

Se utilizó una membrana de intercambio catiónico pre-hidratada (NaCl 5%, 12 h) para separar los compartimentos. La distancia entre ánodo y cátodo fue de 3 cm. El monitoreo de las celdas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital (Fluke 289 - Trendcapture) con el cual se determinó el voltaje (V) de cada celda 2 veces al día

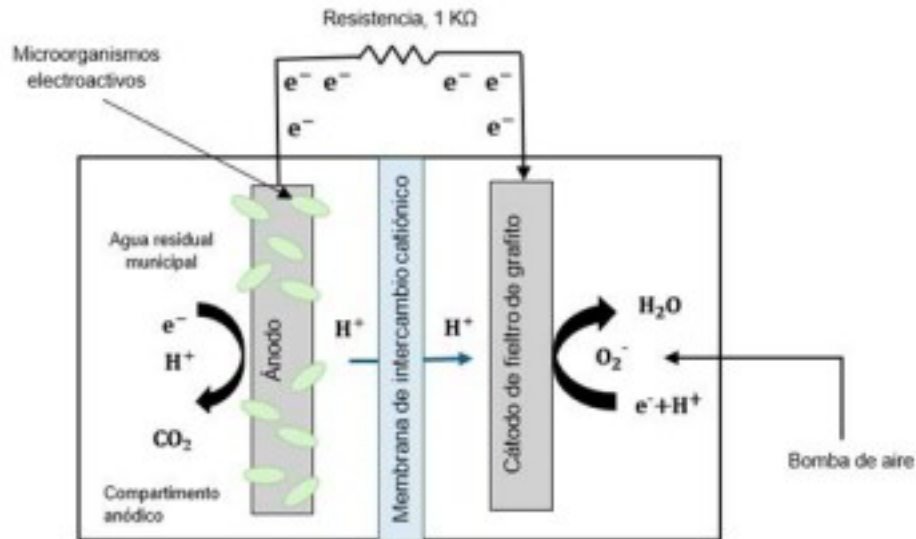
(mañana y noche) durante toda la reacción (48 días, utilizando los primeros 30 días como acondicionamiento para asegurar el desarrollo de la biopelícula en la superficie de los ánodos), empleando una resistencia externa de 1 kΩ para cerrar el circuito y un alambre de acero inoxidable como colector de electrones. La densidad de potencia volumétrica (mW/m<sup>3</sup>) generada en las CCM fue calculada como

$$P_V = \frac{UI}{V} * 1000$$

donde  $U$  es el voltaje (V),  $I$  es la corriente eléctrica (A) y  $V$  es el volumen del compartimento anódico (Luo *et al.*, 2010). Por otra parte, la eficiencia coulombica (%) fue calculada como

$$E_{Cb} = \frac{M \int_0^t I dt}{F b V_{An} \Delta COD}$$

donde  $M = 32$  es el peso molecular del oxígeno,  $I$  es la corriente eléctrica,  $F = 96,485.33$  C/mol es la constante de Faraday,  $b = 4$  es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno,  $V_{An}$  es el volumen del sustrato en el compartimento anódico, y  $\Delta DQO$  es la diferencia de DQO a través del tiempo (Logan *et al.*, 2006). Finalmente, la demanda química de oxígeno (DQO) fue determinada al inicio y al final de la reacción para evaluar la remoción de materia orgánica en el sistema (NMX-AA-030/2-SCFI-2011).



**Fig. 1.** Esquema de las CCM que se utilizaron en este estudio.

#### 2.4 Caracterización electroquímica de las CCM

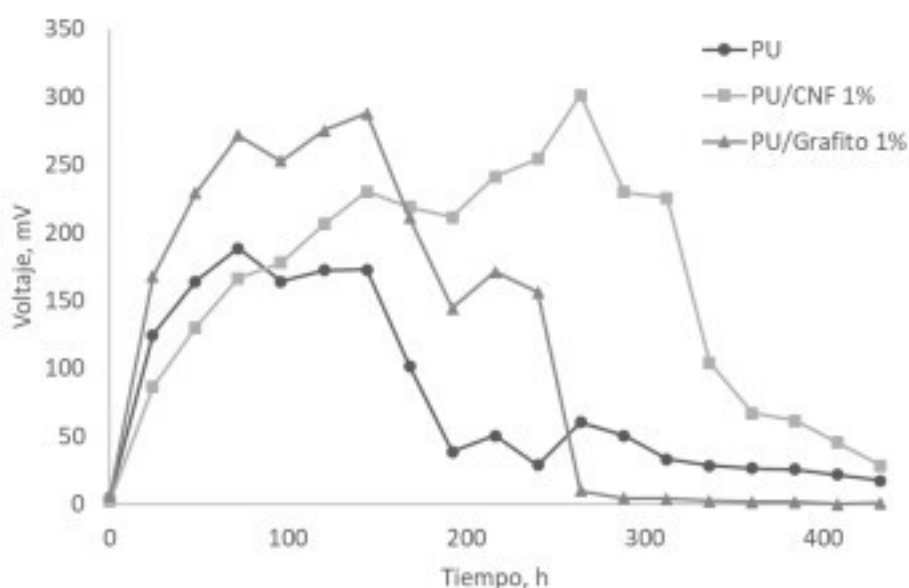
Las curvas de polarización y de densidad de potencia fueron determinadas por el método de resistencia variable al modificar la resistencia externa aplicada al sistema, en un rango de entre  $50 \times 10^{-3}$  y  $100\text{ k}\Omega$ , una vez estabilizado el voltaje. La densidad de potencia obtenida por este método fue normalizada al volumen del compartimento anódico en  $\text{m}^3$ .

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Voltaje

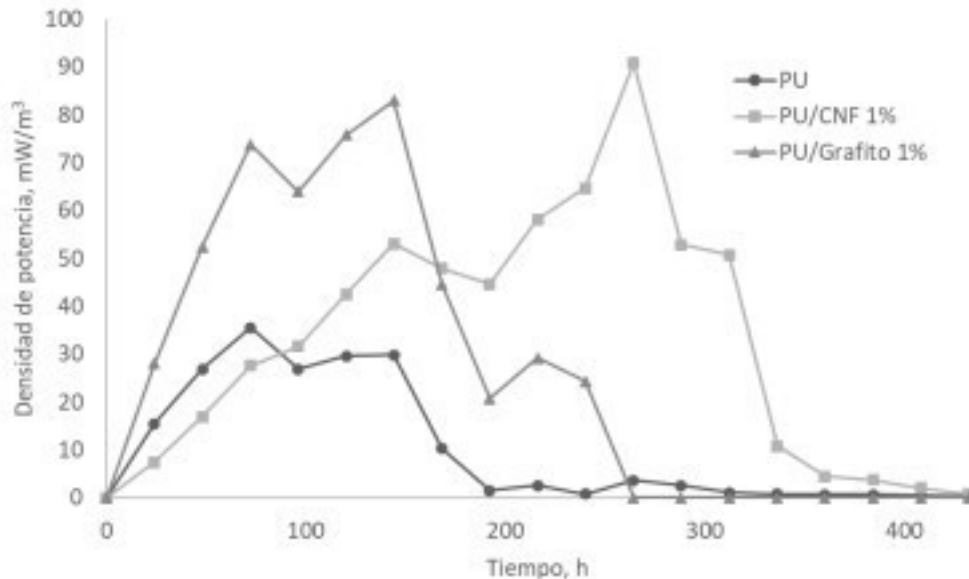
La Fig. 2 muestra el voltaje generado en las CCM. Se observa que el voltaje máximo producido fue de 188.45 mV, 301.3 mV y 288.06 mV para los compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1%, respectivamente. Los resultados obtenidos están fuertemente ligados a las propiedades de los materiales utilizados, donde la alta conductividad eléctrica de las nanofibras de carbono y del grafito potencian la recuperación de los electrones liberados durante la oxidación del sustrato en el sistema (Shen *et al.*, 2014). De igual forma, las propiedades físicas de estos materiales confieren de una mayor rugosidad a los soportes fabricados, fenómeno que promueve la adhesión microbiana y la generación de una biopelícula electroactiva (Hemdan *et al.*, 2023). En general, estos resultados destacan que la modificación del poliuretano con materiales carbonosos incrementa su eficiencia y estabilidad, pudiendo representar un material prometedor para el escalamiento de CCM en sistemas de tratamiento.



**Figura 2.** Voltaje generado en las CCM empacadas con compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% como ánodos.

### 3.2. Densidad de potencia

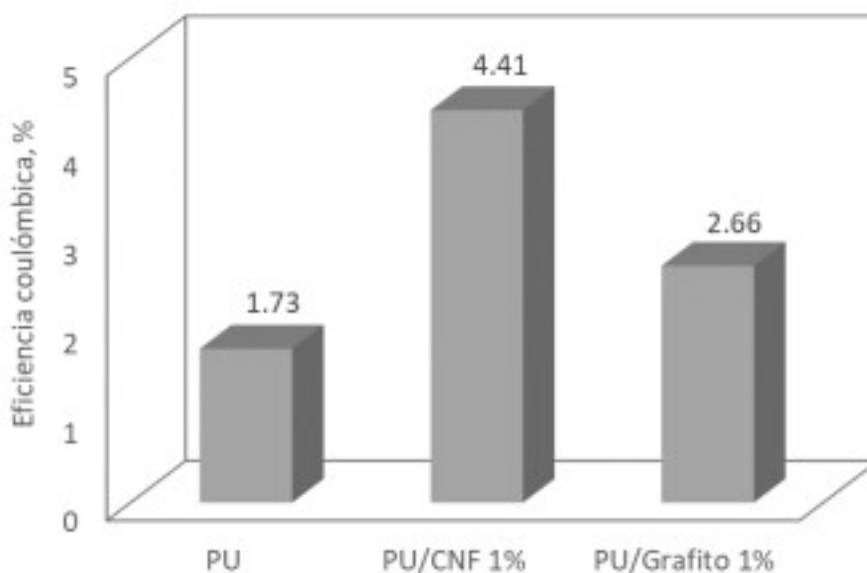
Como se muestra en la Fig. 3, la densidad de potencia máxima alcanzada fue de  $35.51 \text{ mW/m}^3$ ,  $90.78 \text{ mW/m}^3$  y  $82.98 \text{ mW/m}^3$  correspondiente a los compósitos sintetizados a base de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1%, respectivamente. Los valores obtenidos representan un incremento de 2.5 (PU/CNF 1%) y 2.3 (PU/Grafito 1%) veces la densidad de potencia alcanzada por la espuma de poliuretano (PU) en su estado puro. Estos resultados son semejantes a lo reportado anteriormente por otros autores (Capodaglio *et al.*, 2013; Hernández-Flores *et al.*, 2017), lo cual confirma el efecto que tienen los materiales incrustados (nanofibras de carbono y grafito) en el desempeño global de las CCM, al incrementar la conductividad eléctrica y el área superficial de los ánodos sintetizados.



**Figura 3.** Densidad de potencia generada en las CCM empacadas con compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% como ánodos.

### 3.3. Eficiencia coulombica

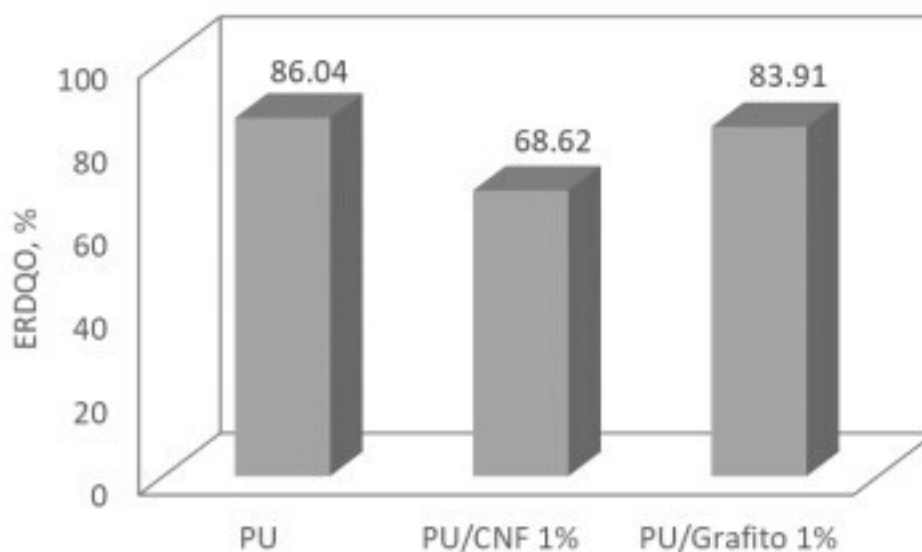
En sistemas bioelectroquímicos (BES), la eficiencia coulombica determina la fracción de electrones recuperados como energía eléctrica a partir de la oxidación de un sustrato (en este caso agua residual municipal cruda). La eficiencia coulombica obtenida por los compósitos sintetizados a base de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% fue de 1.73%, 4.41% y 2.66%, respectivamente (Fig. 4). Como mencionan Zhang *et al.*, (2019), el uso de sustratos ricos en materia orgánica de alta complejidad en CCM (como es el caso de este estudio) puede diversificar significativamente la cantidad de rutas metabólicas (metanogénesis, nitrificación, desnitrificación, sulfato-reducción, etc.) llevadas a cabo por los microorganismos en el sistema. Esto afecta de forma considerable al desempeño global de las CCM en donde dichos sustratos sean utilizados (Vélez-Pérez *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2020). A pesar de lo anterior, los resultados demuestran la capacidad que tienen los microorganismos que habitan en el sistema para utilizar este tipo de soportes como aceptores finales de electrones, y la viabilidad de aplicar este tipo de materiales como ánodos en sistemas bioelectroquímicos para la generación de energía eléctrica.



**Figura 4.** Eficiencia coulombica obtenida en las CCM.

### 3.4. Eficiencia de remoción de la DQO en las CCM

La Fig. 5 muestra la tasa de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) en las CCM. Se puede observar que los compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% lograron remover un 86.04%, 68.62% y 83.91%, de la DQO presente en los sistemas, respectivamente. El análisis de los materiales sintetizados, indica una disminución en el diámetro de los poros de la matriz de poliuretano al incrustar las partículas de grafito y CNF. Esto, provoca un incremento en el área superficial de los compósitos fabricados, pero disminuye la tasa de transferencia del sustrato a los microorganismos que habitan en el soporte (ánodo). Múltiples autores, identifican a la distribución del sustrato y su interacción con los microorganismos en el sistema, como una de las principales variables que disminuyen la generación de energía eléctrica y la remoción de materia orgánica en CCM (Cabrera *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2019). Este fenómeno explica los resultados obtenidos, no siendo estos concluyentes ya que dicho comportamiento puede verse modificado al utilizar sistemas con agitación asistida o alimentación continua (Rossi *et al.*, 2019).



**Figura 5.** Eficiencia de remoción de la DQO en las CCM.

## CONCLUSIÓN

De acuerdo a los datos obtenidos en la evaluación de dos tipos de ánodos modificados, PU/CNF 1% y PU/Grafito 1% mostraron un mayor voltaje en comparación con el ánodo de espuma de poliuretano sin modificar, debido a que estos materiales promueven una mejor adhesión microbiana y, en consecuencia, mejoran la conductividad eléctrica. Sin embargo, el ánodo modificado PU/CNF 1% presentó un desempeño más sobresaliente que el PU/Grafito 1%, alcanzado un voltaje de 301.3 mV, una densidad de potencia de 90.78 mW/m<sup>3</sup> (equivalente a un incremento de 2.5 veces respecto al poliuretano puro), una eficiencia coulombica de 4.41% y una eficiencia de remoción de DQO del 68.62%. La modificación del poliuretano mediante la incorporación de materiales carbonosos mejora significativamente su eficiencia y estabilidad, es por eso que los convierte en materiales con gran potencial para el escalamiento de CCM en sistemas de tratamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Elrahman, N. K., Al-Harbi, N., Basfer, N. M., Al-Hadeethi, Y., Umar, A., & Akbar, S. (2022). Applications of Nanomaterials in Microbial Fuel Cells: A Review. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(21), 7483.
- Banerjee, A., Calay, R. K., & Mustafa, M. (2022). Review on material and design of anode for microbial fuel cell. *Energies*, 15(6), 2283.
- Benavides, B. E. A., & Zambrano, J. S. (2020). GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS. *CONCIENCIA Y TÉCNICA*, 4(1), 133-136.
- Bernal-Martínez, L. A., Solís-Morelos, C., Linares-Hernández, I., Barrera-Díaz, C., & Colín-Cruz, A. (2011). Tratamiento de agua residual municipal por un sistema fisicoquímico y oxidación química en flujo continuo. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(2), 69-81.
- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5-11.
- Cabrera, J., Dai, Y., Irfan, M., Li, Y., Gallo, F., Zhang, P., Zong, Y., & Liu, X. (2022). Novel continuous up-flow MFC for treatment of produced water: flow rate effect, microbial community, and flow simulation. *Chemosphere*, 289, 133186.
- Capodaglio, A. G., Molognoni, D., Dallago, E., Liberale, A., Cella, R., Longoni, P., & Pantaleoni, L. (2013). Microbial fuel cells for direct electrical energy recovery from urban wastewaters. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 634738.
- Cárdenas, D., Villegas, J. R., Solís, C., Sanabria-Chinchilla, J., Uribe, L., & Fuentes-Schweizer, P. (2022). Evaluación del desempeño de una celda de combustible microbiana con electrodo de grafito modificado para el tratamiento de agua residual del procesamiento del café. *Revista Colombiana de Química*, 51(1), 40-47.

García-Navarro, J., Bautista-Vargas, M., & Esther, H.-S. (2017). Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana. Artículo Revista de Operaciones Tecnológicas Septiembre, 1(3), 48–56.

Hemdan, B. A., El-Taweel, G. E., Naha, S., & Goswami, P. (2023). Bacterial community structure of electrogenic biofilm developed on modified graphite anode in microbial fuel cell. *Scientific Reports*, 13(1), 1255.

Hernández-Flores, G., Solorza-Feria, O., & Poggi-Varaldo, H. M. (2017). Bioelectricity generation from wastewater and actual landfill leachates: A multivariate analysis using principal component analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(32), 20772-20782.

Huamán, W. S., Pastrana, P. A. P., Victoria, H. M. D., & Córdova, L. A. T. (2022). Aguas residuales en la calidad de agua del río. *GnosisWisdom*, Vol. 2(3), pp. 30-36.

Kalathil, S., Patil, S. A., & Pant, D. (2018). Microbial fuel cells: electrode materials. *Encyclopedia of interfacial chemistry*, 309, 318.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental science & technology*, 40(17), 5181-5192.

López-Alejo, J. E., & Elizalde-Martínez, I. (2021). Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica. PP 44.

López-Vázquez, C. M., Méndez, G. B., Carrillo, F. C., & García, H. H. (Eds.). (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. IWA publishing. Vol. 1(1) p. 9 & 169.

Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 759-764.

Martínez Castillejo, F. (2022). *Tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales*. Servicio de Publicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos. P. 8

Martínez-Castrejón, M., Ramírez-Nava, J., & Hernández-Flores, G. (2020) Celdas de Combustible Microbianas: Tecnología para Tratamiento de Efluentes Residuales y Generación de Bioelectricidad. 7.

Mohyudin, S., Farooq, R., Jubeen, F., Rasheed, T., Fatima, M. y Sher, F. (2022). Celdas de combustible microbianas: una tecnología de vanguardia para el tratamiento de aguas residuales y la generación de bioelectricidad. *Environmental research* , 204 , 112387.

Munoz-Cupa, C., Hu, Y., Xu, C., & Bassi, A. (2021). An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. *Science of the Total Environment*, 754, 142429.

NORMA MEXICANA NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de Agua– Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas–Método de prueba–Parte 2–Determinación del índice de la Demanda Química de Oxígeno–Método de tubo sellado a pequeña escala. Diario Oficial de la Federación, 27 de junio 2013.

Pan, Y., Zhu, T., & He, Z. (2019). Energy advantage of anode electrode rotation over anolyte recirculation for operating a tubular microbial fuel cell. *Electrochemistry Communications*, 106, 106529.

Patiño, Y., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Microcontaminantes emergentes en aguas: tipos y sistemas de tratamiento. *Avances en ciencias e ingeniería*, 5(2), pp 8-9.

Paucar, N. E., & Sato, C. (2022). Coupling microbial fuel cell and hydroponic system for electricity generation, organic removal, and nutrient recovery via plant production from wastewater. *Energies*, 15(23), 9211.

Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28.

Rossi, R., Evans, P. J., & Logan, B. E. (2019). Impact of flow recirculation and anode dimensions on performance of a large scale microbial fuel cell. *Journal of power sources*, 412, 294-300.

Salas-Tovar, JA, Escobedo-García, S., Olivas, GI, Acosta-Muñiz, CH, Harte, F. y Sepulveda, DR (2021). Variación inducida por el método en la prueba MATH de hidrofobicidad de la superficie celular bacteriana. *Journal of Microbiological Methods* , 185 , 106234.

Shen, Y., Zhou, Y., Chen, S., Yang, F., Zheng, S., & Hou, H. (2014). Carbon nanofibers modified graphite felt for high performance anode in high substrate concentration microbial fuel cells. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 130185.

Toledo, F. M. S. (2022). Evaluación del efecto de distintos factores en el rendimiento de celdas de combustible microbianas con visión a un futuro escalamiento del sistema (Proyecto integrador profesional). Universidad Nacional del Comahue. Vol. 1 pp. 29-31.

Vélez-Pérez, L. S., Ramirez-Nava, J., Hernández-Flores, G., Talavera-Mendoza, O., Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M., Solorza-Feria, O., & López-Díaz, J. A. (2020). Industrial acid mine drainage and municipal wastewater co-treatment by dual-chamber microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13757-13766.

Yaqoob, A. A., Mohamad Ibrahim, M. N., Rafatullah, M., Chua, Y. S., Ahmad, A., & Umar, K. (2020). Recent advances in anodes for microbial fuel cells: an overview. *Materials*, 13(9), 2078.

Yazdi, A. A., D'Angelo, L., Omer, N., Windiasti, G., Lu, X., & Xu, J. (2016). Carbon nanotube modification of microbial fuel cell electrodes. *Biosensors and Bioelectronics*, 85, 536-552.

Ye, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Zhang, X., Zhang, S., Luo, G., & Liu, Y. (2020). Impacts of hydraulic retention time on a continuous flow mode dual-chamber microbial fuel cell for recovering nutrients from municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, 734, 139220.

Zhang, L., Fu, G., & Zhang, Z. (2019). Simultaneous nutrient and carbon removal and electricity generation in self-buffered biocathode microbial fuel cell for high-salinity mustard tuber wastewater treatment. *Bioresource technology*, 272, 105-113.