

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Generación de energía eléctrica y tratamiento de efluentes de la industria cárnica en un sistema bioelectroquímico utilizando ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono

Por:

LIZBETH LUNA BARRÓN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Generación de energía eléctrica y tratamiento de efluentes de la industria cárnica en un sistema bioelectroquímico utilizando ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono

Por:


LIZBETH LUNA BARRÓN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

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. Etelberto Cortez Quevedo
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Generación de energía eléctrica y tratamiento de efluentes de la industria cárnica en un sistema bioelectroquímico utilizando ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono

Por:

LIZBETH LUNA BARRÓN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el jurado examinador:


Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Presidente


Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Vocal


M.C. Eteberto Cortez Quevedo
Vocal


Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Vocal suplente


M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería
Buenavista, Saltillo Coahuila, México



Junio 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 hacer 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

A handwritten signature in black ink, appearing to be a stylized name, is written over a faint, illegible printed name. The signature is fluid and cursive.

DEDICATORIA

Este apartado lo dedico a las personas más importantes de mi vida:

A esa niña inocente que soñaba con llegar lejos; a la adolescente que solo anhelaba crecer; a la joven que luchó con sus propios pensamientos para salir adelante y que, con el tiempo, comprendió que cada vivencia, cada cambio y cada aprendizaje son esenciales para crecer.

A mi madre y Hermana,

que ha estado conmigo en cada etapa de mi vida, desde el preescolar hasta mi camino profesional. A ellas le dedico lo que soy, porque me compartió sus alas para volar. Una mujer fuerte y soñadora que salió adelante por sus hijas. Gracias por nunca soltar mi mano, por amarme y apoyarme incluso en mis errores.

A mi hermana menor que siempre me dio fuerza para seguir adelante. Gracias por tantas ocurrencias que pasamos juntas, y por ser mi compañera de vida.

A mi abuelo paterno,

quien fue mucho más que un padre en vida. Le dedico estas palabras con profundo cariño y respeto, aunque ya no esté presente en este plano terrenal. Te sigo recordando con el mismo afecto de siempre, porque el amor verdadero no desaparece, solo se transforma en memoria viva.

A mis amigas y mi novio,

A mis amigas Joselin, Claudia y Ana Lilia que estuvieron apoyándome mental, sentimental y profesional durante la carrera. Gracias por todas las enseñanzas y aventuras. Siempre les llevaré en un apartado de mi corazón.

A Manuel Saldívar por acompañarme en este camino y estar presente en los momentos importantes. Gracias por tu apoyo, tu compañía y por compartir conmigo esta etapa de vida. Valoro todo lo que hemos aprendido y crecido juntos.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Antonio Narro por haber formado a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, y acogerme en tu recinto. Por ser una persona profesional, y humana en todos los sentidos. Gracias por todas las vivencias que me permitió.

Gracias al Dr. Pedro Pérez Rodríguez que fue mi asesor principal, que nos acompañó, asesoró, y apoyo durante toda la tesis, con materiales, conocimiento y palabras de aliento. Gracias por ser tan comprensivo en este largo proceso, y brindarnos la confianza para darle seguimiento en el proyecto.

Gracias al Dr. José Antonio por su valioso apoyo al proporcionar los materiales y recursos necesarios para el desarrollo de esta tesis. Su disposición para compartir su conocimiento y facilitar el acceso contribuyó significativamente a la consolidación de este trabajo. Agradezco sinceramente su colaboración y el tiempo dedicado, que fueron de gran ayuda en las distintas etapas de esta investigación.

Gracias a la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador que fue mi coasesora. Por realizar las mediciones durante la toma de datos. Gracias que me permitió asistir de manera oyente a su clase de Contaminación ambiental, para aprender y pulir técnicas de laboratorio en el tema de análisis de aguas residuales por diferentes métodos.

M.C Etelberto Cortez Quevedo por todo el apoyo que nos proporcionó durante la carrera, agradezco su participación en este trabajo. valoro el tiempo y la atención que dedicó durante el proceso.

Q.F.B Brenda Verónica Borrego Limón por haber estado apoyando en los análisis requeridos, y ayudarnos con su conocimiento para comprender mejor las técnicas de análisis sobre las aguas residuales.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVO GENERAL.....	12
Objetivos específicos.....	12
HIPÓTESIS	13
CAPÍTULO I.....	14
REVISIÓN DE LITERATURA	14
1.1. Contaminación generada por la industria cárnica.....	14
1.1.1. Caracterización de los efluentes de la industria cárnica.....	14
1.2. Métodos convencionales de tratamiento de efluentes	16
1.3. Sistemas bioelectroquímicos (SBE)	17
1.3.1. Celdas de combustible microbianas (CCM).....	18
1.3.2. Celdas de electrolisis microbianas (CEM)	19
1.3.3. Principios fundamentales de los SBE	20
1.4. Ánodos en SBE: materiales y propiedades.....	21
1.5. Parámetros de eficiencia en SBE	22
CAPÍTULO II	24
MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Ubicación del experimento.....	24
2.2. Tipo de agua y lugar de colecta	25
2.3. Síntesis de los soportes anódicos.....	25
2.4. Inmovilización de microorganismos en soportes anódicos.....	25
2.5. Construcción y operación de la CCM.....	25
2.6. Caracterización electroquímica de las CCM:	26
CAPÍTULO III	28
RESULTADOS Y DISCUSIONES	28
3.1. Voltaje.....	28
3.2. Densidad de potencia	29
3.3. Eficiencia de remoción de DQO	29

3.4. Eficiencia coulombica.....	30
3.5. Curvas de polarización y potencia	31
CONCLUSIÓN	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema base de una celda de combustible microbiana.....	18
Figura 2. Esquema base de una celda de electrólisis microbiana.....	19
Figura 3. Configuración de las CCM utilizadas en los experimentos.....	26
Figura 4. Voltaje generado por las CCM empacada con los compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 0.5% como ánodos.....	27
Figura 5. Densidad de potencia generada por las CCM empacada con los compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 0.5% como ánodos.....	28
Figura 6. Eficiencia de remoción de DQO al final del ciclo operativo de las CCM.....	29
Figura 7. Eficiencia coulombica obtenida en las CCM.....	30
Figura 8. Curvas de polarización y densidad de potencia en función de la densidad de corriente generada en la CCM empacada con un compósito de PU/Grafito 0.5% como ánodo.....	31

RESUMEN

En este estudio, compósitos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono (PU, PU/Grafito 0.5% y PU/CNF 1%) fueron sintetizados y utilizados como ánodos en celdas de combustible microbianas de doble compartimento durante el tratamiento de efluentes de la industria cárnica, evaluando la generación de energía eléctrica y la remoción de materia orgánica. La densidad de potencia, eficiencia de remoción de DQO y eficiencia coulombica máximas alcanzadas en las CCM empacadas con los compósitos de PU, PU/Grafito 0.5% y PU/CNF 1% fueron de 31.33 mW/m³, 30.90 mW/m³ y 32.4 mW/m³, 92.57%, 94.18% y 99.22%, y 0.4726%, 0.4778% y 0.4677%, respectivamente. Además, la resistencia interna de la CCM con mejor desempeño bioelectroquímico (PU/Grafito 0.5%) fue de 3204.54 Ω . Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad de utilizar este tipo de materiales en CCM de doble compartimento para la generación de energía eléctrica y el tratamiento de efluentes de la industria cárnica.

INTRODUCCIÓN

La industria cárnica representa un sector clave en la economía mundial, sin embargo, produce una gran cantidad de residuos y efluentes que plantean serios desafíos ambientales. Los efluentes generados por esta industria son ricos en materia orgánica, grasas, proteínas y otros compuestos que pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos si no son tratados adecuadamente. Además, el proceso de tratamiento de estos efluentes a menudo requiere grandes cantidades de energía, lo que aumenta la huella ambiental de esta industria.

En este orden de ideas, los sistemas bioelectroquímicos emergen como una tecnología innovadora y prometedora para abordar dos de los principales problemas de la industria: la generación de energía eléctrica directamente aprovechable y el tratamiento de los efluentes contaminantes. Los sistemas bioelectroquímicos aprovechan la actividad metabólica de microorganismos para generar electricidad a partir de sustratos orgánicos, a la vez que permiten la remoción de contaminantes.

El presente trabajo busca contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles que puedan reducir el impacto ambiental de este sector productivo (la industria cárnica). A través de esta investigación, se pretende evaluar el potencial de los sistemas bioelectroquímicos como una solución integral que combine la producción de energía limpia y el tratamiento eficiente de efluentes industriales, abriendo nuevas posibilidades para la sostenibilidad de este sector.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la generación de energía eléctrica y tratamiento de efluentes de la industria cárnica en un sistema bioelectroquímico escala laboratorio utilizando ánodos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono.

Objetivos específicos.

1. Sintetizar compósitos semiconductores de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono.
2. Evaluar parámetros fisicoquímicos y eléctricos del sistema bioelectroquímico empacado con compósitos semiconductores durante el tratamiento de efluentes de la industria cárnica.
3. Caracterizar electroquímicamente el sistema bioelectroquímico.

HIPÓTESIS

La aplicación de compósitos semiconductores de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono en sistemas bioelectroquímicos incrementará la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica, durante el tratamiento de efluentes de la industria cárnica.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Contaminación generada por la industria cárnica

A nivel global, la industria cárnica es una fuente significativa de contaminación debido a la gran cantidad de aguas residuales que genera. Se estima que solo la industria de aguas residuales de rastros en Europa produce 145 millones de m³ al año que requieren tratamiento antes de su descarga. A nivel mundial, la producción de carne se ha duplicado en los últimos treinta años y se prevé que este consumo siga aumentando rápidamente, lo que sugiere un incremento paralelo en la generación de aguas residuales a escala global (Çetinkaya y Bilgili, 2022).

Estas aguas residuales, si no se tratan adecuadamente, presentan un alto potencial de contaminación y pueden causar graves problemas ambientales y de salud pública. Entre los impactos globales se encuentran (Hellal et al., 2024):

- Eutrofización de aguas superficiales y contaminación de aguas subterráneas debido al alto contenido de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y fósforo.
- Contribución a la emisión de gases de efecto invernadero.
- Riesgos para la salud pública, especialmente en países en desarrollo, debido a la descarga de aguas residuales sin tratamiento.
- La generación de volúmenes masivos de aguas residuales a nivel mundial.

1.1.1. Caracterización de los efluentes de la industria cárnica

La caracterización de estos efluentes implica el análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos que determinan su grado de contaminación. De entre estos, destacan:

- Carga orgánica: las aguas residuales del rastro se caracterizan por tener una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). Los rangos reportados para la DQO varían de 1,000 a 20,000 mg/L y para la DBO de 200 a 8,232 mg/L. Esta alta carga orgánica puede llevar al consumo de oxígeno disuelto en cuerpos de agua naturales y a la generación de malos olores (Palomares-Rodríguez et al., 2017).
- Las aguas residuales de los rastros contienen cantidades significativas de grasas y aceites. La eliminación de estas sustancias es un desafío común en el tratamiento de estas aguas residuales. La presencia de estos contaminantes contribuye en gran medida a la DBO y la DQO, y puede causar problemas como obstrucción de tuberías y formación de capas de espuma en los biorreactores (Musa et al., 2018).
- Microorganismos patógenos: las aguas residuales de la industria cárnica pueden contener diversos microorganismos, incluyendo bacterias resistentes a los antibióticos. También existe la posibilidad de contaminación con virus fecales y animales. Se ha estudiado la presencia de *Listeria monocytogenes* en aguas residuales de rastros. Además, se ha evaluado el riesgo de infección por encefalopatía espongiforme bovina (EEB) a través de lodos de depuradoras de mataderos utilizados como fertilizantes (Ng et al., 2022).
- Sales: estas aguas residuales contienen altos niveles de nitrógeno total y fósforo total, con rangos de 40-700 mg/L y 4-410 mg/L, respectivamente. Estas sales pueden causar eutrofización en los cuerpos de agua si no se eliminan adecuadamente. Se ha investigado la posibilidad de utilizar estos nutrientes para el crecimiento de biomasa de microalgas (Terán-Hilares et al., 2022).

1.2. Métodos convencionales de tratamiento de efluentes

Los métodos actuales de tratamiento de aguas residuales implican una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos, así como operaciones para remover partículas insolubles y contaminantes solubles. A lo largo de las últimas tres décadas, se han reportado diversas tecnologías como son la flotación, coagulación/floculación, oxidación, adsorción, intercambio iónico, filtración por membrana y electroquímica (Crini y Lichtfouse, 2019; Mara, 2013).

- Flotación: proceso de separación integrado físico-químico, útil para la clarificación primaria y eficiente para la eliminación de partículas pequeñas y de baja densidad. Puede ser selectivo para metales y se utiliza como tratamiento terciario en la industria de la pulpa y el papel.
- Coagulación/floculación: es económicamente favorable y eficiente, adaptado a altas cargas de contaminantes y muy eficiente para la eliminación de metales y fluoruro. Sin embargo, no es selectivo para metales, requiere consumo de químicos y produce una alta cantidad de lodos.
- Oxidación (con ozono): es eficiente para la eliminación de cianuro y sulfuro, acelera la ruptura de enlaces azo, aumenta la biodegradabilidad y desinfecta. Sin embargo, requiere químicos, pretratamiento y su eficiencia depende del tipo de oxidante.
- Adsorción (con carbón activado): es tecnológicamente simple, adaptable a muchos formatos de tratamiento, efectivo para una amplia variedad de contaminantes y proporciona una excelente calidad del efluente. Sin embargo, puede requerir una alta inversión, tiene costos de materiales y puede no ser efectivo con ciertos tipos de tintes y algunos metales.
- Intercambio iónico: proceso no destructivo con una amplia gama de productos comerciales disponibles, tecnológicamente simple y fácil de controlar y mantener. Puede aplicarse a diferentes regímenes de flujo y producir un efluente tratado de alta calidad. Sin embargo, tiene limitaciones

económicas, requiere grandes volúmenes para grandes caudales y puede sufrir saturación y ensuciamiento.

- Filtración por membrana (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis): son procesos de separación no destructivos con una amplia gama de membranas comerciales disponibles y numerosas aplicaciones. Requieren poco espacio, son simples, rápidos y eficientes, incluso a altas concentraciones, y producen un efluente de alta calidad sin necesidad de químicos. No obstante, los costos iniciales a menudo son altos para pequeñas y medianas industrias, tienen altos requisitos de energía y pueden sufrir un rápido ensuciamiento de la membrana.
- Electroquímica (electrocoagulación, electroflotación, electrooxidación): son tecnologías eficientes para la recuperación/reciclaje de metales valiosos, adaptables a diferentes cargas de contaminantes y caudales, y pueden aumentar la biodegradabilidad. La electrocoagulación puede ser más efectiva que la coagulación tradicional en la separación de materia orgánica. Sin embargo, tienen altos costos iniciales de equipo y de mantenimiento, pueden requerir la adición de químicos y sufrir pasivación de ánodos.

1.3. Sistemas bioelectroquímicos (SBE)

Los sistemas bioelectroquímicos son una tecnología emergente que utiliza microorganismos para catalizar procesos de oxido-reducción a través de la liberación/captura de electrones de un electrodo. Al combinar sistemas biológicos vivos con electroquímica, los SBE pueden utilizarse para una gran variedad de aplicaciones (Gadkari et al., 2018).

Un SBE, al igual que cualquier otra celda electroquímica (por ejemplo, una batería alcalina), requiere un ánodo, un cátodo y una membrana de intercambio iónico (opcional). La diferencia principal radica en cómo se cataliza la reacción electroquímica. En los SBE, al menos una o ambas reacciones de los electrodos

son catalizadas con la ayuda de microorganismos. Estos microorganismos pueden interactuar con los electrodos para transferir electrones (Zheng et al., 2020).

Existe una gran variedad de SBE, los cuales suelen ser clasificados según su aplicación final, siendo las celdas de combustible microbianas (CCM) y las celdas de electrólisis microbianas (CEM) los sistemas más estudiados.

1.3.1. Celdas de combustible microbianas (CCM)

Las celdas de combustible microbianas son sistemas bioelectroquímicos que convierten el poder reductor microbiano (generado por la metabolización de sustratos orgánicos) en energía eléctrica mediante la oxidación de materia orgánica e inorgánica (Ieropoulos et al., 2005).

El funcionamiento básico de una CCM implica que los electrones producidos por las bacterias a partir de estos sustratos se transfieren al ánodo y fluyen hacia el cátodo a través de un circuito conductor externo, lo que conduce a la producción de electricidad debido a la diferencia de potencial acoplada al flujo de electrones. Generalmente, el ánodo y el cátodo están separados por una membrana (Slate et al., 2019).

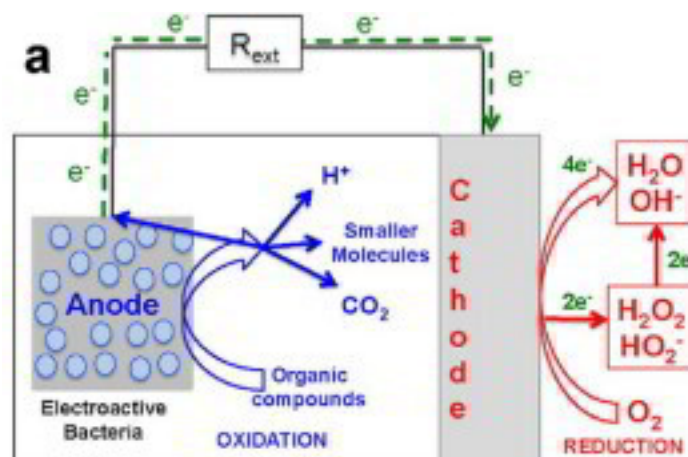


Figura 1. Esquema base de una celda de combustible microbiana (Santoro et al., 2017).

1.3.2. Celdas de electrolisis microbianas (CEM)

Las celdas de electrolisis microbianas son un tipo de sistema bioelectroquímico que utiliza microorganismos como biocatalizadores para llevar a cabo reacciones de oxidación y/o reducción en electrodos. En esencia, son reactores en los que se aplica un pequeño voltaje externo entre un ánodo y un cátodo para forzar la generación de corriente y producir gas hidrógeno en el cátodo a través de la reducción de protones (Logan et al., 2008).

Este proceso de producción de hidrógeno mediante CEM se basa en la modificación de las celdas de combustible microbianas. Al igual que en las CCM, en una CEM los microorganismos anódicos oxidan la materia orgánica presente en un sustrato, liberando dióxido de carbono y protones en la solución, y electrones hacia el ánodo. Estos electrones fluyen desde el ánodo a través de un circuito eléctrico externo hasta el cátodo. Sin embargo, a diferencia de las CCM donde el oxígeno se reduce espontáneamente en el cátodo, en las CEM se excluye el oxígeno del cátodo y se aplica una energía adicional al circuito para permitir que las reacciones endergónicas tengan lugar, generando productos como el gas hidrógeno (Tartakovsky et al., 2009).

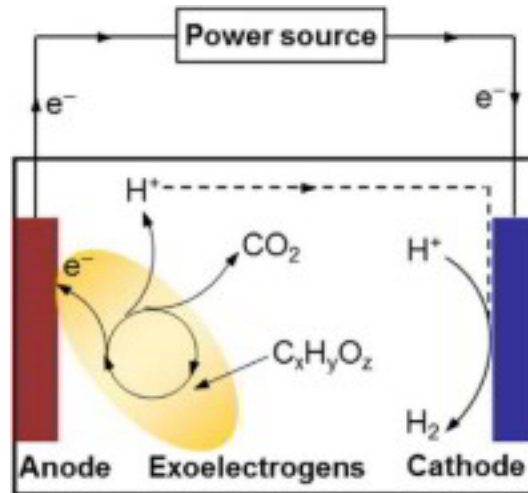


Figura 2. Esquema base de una celda de electrolisis microbiana (Lu y Ren, 2016).

1.3.3. Principios fundamentales de los SBE

Los principios de funcionamiento fundamentales de los SBE incluyen los siguientes aspectos clave:

- **Bioánodo:** en la mayoría de los SBE, los microorganismos se adhieren a un electrodo llamado ánodo. Estos microorganismos, a menudo denominados exoelectrógenos, oxidan un sustrato (que puede ser materia orgánica presente en aguas residuales, compuestos específicos, o incluso exudados de raíces de plantas). Esta oxidación metabólica libera electrones y protones (Ivase et al., 2020).
- **Transferencia de electrones:** los electrones generados en el ánodo fluyen a través de un circuito externo hacia otro electrodo llamado cátodo, debido a la diferencia de potencial creada (Liu et al., 2014).
- **Transferencia de protones:** los protones producidos en el ánodo migran hacia el cátodo a través de un electrolito iónico que a menudo está separado por una membrana de intercambio iónico o, en algunos diseños, por una simple separación física. Esta membrana selectiva permite el paso de iones

(principalmente protones) mientras evita el paso de electrones y, en algunos casos, del sustrato o productos (Hamelers et al., 2010).

- **Cátodo:** en este componente, los electrones que llegan a través del circuito externo y los protones que migran a través del electrolito se combinan con un aceptor de electrones. El aceptor de electrones más común es el oxígeno, que al reducirse forma agua. Sin embargo, se pueden utilizar otros aceptores como nitrato, sulfato o incluso ciertos contaminantes, lo que permite la biorremediación simultánea. En algunos SBE, también se pueden emplear biocátodos, donde los microorganismos catalizan la reacción de reducción en el cátodo (Sayed et al., 2021).

1.4. Ánodos en SBE: materiales y propiedades

Los ánodos en los sistemas bioelectroquímicos suelen ser fabricados principalmente de materiales basados en carbono debido a su buena conductividad eléctrica y bajo costo (Gul & Ahmad, 2019). Algunos ejemplos son:

- **Grafito:** en diversas formas como electrodos de grafito, varillas de grafito, placas de grafito y partículas de grafito. El fieltro de grafito y la espuma de grafito también se utilizan por su alta superficie específica (Rahimnejad et al., 2015).
- **Papel y tela de carbono:** son materiales porosos que ofrecen una buena superficie para la colonización microbiana (Zhang et al., 2019).
- **Nanotubos de carbono (NTC):** se utilizan para aumentar la eficiencia de la transferencia de electrones debido a su alta conductividad y área superficial. Pueden formar parte de ánodos compuestos (Yu et al., 2017).
- **Cepillos de grafito:** ofrecen una alta área superficial y una excelente estructura de poros, lo que resulta en una mayor producción de energía (Wilberforce et al., 2021).

También se han explorado materiales metálicos como el acero inoxidable y el titanio para la fabricación de ánodos, aunque son menos comunes que los materiales de carbono (Gude et al., 2013).

Las propiedades importantes de los materiales del ánodo en los SBE incluyen (Santoro et al., 2020; Xie et al., 2015):

- Alta conductividad eléctrica: para facilitar el flujo eficiente de electrones.
- Gran área superficial: para maximizar la adhesión microbiana y la transferencia de electrones.
- Biocompatibilidad: el material debe ser adecuado para el crecimiento y la actividad de los microorganismos.
- Estabilidad química: el material debe resistir la degradación en el entorno del SBE.
- Resistencia a la corrosión: especialmente importante para los ánodos metálicos.
- Hidrofilicidad: puede mejorar la adhesión bacteriana.
- Porosidad: facilita el transporte de masa y la colonización microbiana.
- Bajo costo: es un factor importante para la aplicabilidad a gran escala.

1.5. Parámetros de eficiencia en SBE

Los parámetros de eficiencia de los sistemas bioelectroquímicos son diversos y dependen del objetivo específico del sistema (por ejemplo, producción de energía, tratamiento de aguas residuales, producción de hidrógeno, eliminación de contaminantes). A continuación, se presentan algunos parámetros clave más destacados:

- Eficiencia de voltaje: este parámetro se refiere a la relación entre el voltaje real de la celda y el voltaje termodinámico teórico necesario para la reacción

deseada (por ejemplo, la electrólisis del agua en CEM). Una alta eficiencia de voltaje es deseable para minimizar las pérdidas de energía (Ki et al., 2016).

- Densidad de corriente: mide la cantidad de corriente eléctrica producida por unidad de área de electrodo (A/m^2) o por unidad de volumen de reactor (A/m^3). Una alta densidad de corriente es un indicador de un buen rendimiento del sistema (Logan et al., 2006).
- Densidad de potencia: indica la cantidad de potencia eléctrica generada por unidad de área de electrodo (W/m^2) o por unidad de volumen de reactor (W/m^3). La maximización de la densidad de potencia es un objetivo clave en el desarrollo de CCM (Rabaey & Verstraete, 2005).
- Eficiencia coulombica (EC): representa la fracción de electrones obtenidos del sustrato que se recuperan en forma de corriente eléctrica o se utilizan para la producción del producto deseado (por ejemplo, hidrógeno). Una alta eficiencia coulombica indica que una mayor proporción del sustrato se convierte en electrones útiles (Kundu et al., 2013).
- Recuperación catódica de hidrógeno: en CEM para la producción de hidrógeno, este parámetro indica la cantidad de hidrógeno producido en el cátodo en comparación con la cantidad teóricamente posible basada en la corriente que pasa a través de la celda (Heidrich et al., 2013).
- Tasa de producción de metano: En CEM para la producción de metano (electrometanogénesis), este parámetro mide el volumen de metano producido por unidad de volumen de reactor por día (Van Eerten-Jansen et al., 2012).

Es importante notar que la optimización de un parámetro de eficiencia a menudo puede afectar a otros, por lo que es necesario considerar múltiples parámetros para una evaluación completa del rendimiento de un SBE. Además, factores como el diseño del reactor, los materiales de los electrodos, la comunidad microbiana, las condiciones de operación (temperatura, pH, carga orgánica, etc.) y la presencia de

otros contaminantes pueden influir significativamente en estos parámetros de eficiencia (Yan et al., 2019).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del experimento

El presente estudio se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en el Departamento de Suelos en el laboratorio de Química de Suelos ubicados en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

2.2. Tipo de agua y lugar de colecta

Para la realización de este estudio, se utilizó agua residual cruda, proveniente del rastro municipal de Saltillo, Coahuila. La muestra fue utilizada sin ningún tipo de acondicionamiento previo.

2.3. Síntesis de los soportes anódicos

Para la fabricación de los polímeros espumados compuestos al 0.5 y 1 % (en peso), 1.3 g de grafito y 2.6 g de nanofibras de carbono se dispersaron mediante agitación mecánica hasta su homogeneización en 150 ml de polioliol, cada uno. Posteriormente, se añadieron 64 ml de diisocianato 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 durante 25 minutos. La espuma fue curada en un horno a 100 °C durante 4 h.

2.4. Inmovilización de microorganismos en soportes anódicos

Los soportes sintetizados fueron recortados en 6 piezas de 10 cm² y fueron colocados en el compartimento anódico de las CCM escala laboratorio (dos soportes por celda), donde se añadieron 1000 ml de agua residual cruda (previamente descrita), como sustrato e inóculo. El acondicionamiento fue llevado a cabo durante 30 días a temperatura ambiente.

2.5. Construcción y operación de la CCM.

La figura 2.1 muestra la configuración de las celdas de combustible microbianas (CCM) utilizadas en estos experimentos. Se utilizaron CCM de doble compartimento de un volumen aproximado de 2000 ml (1000 ml cada compartimento), agregando una pieza de fieltro de grafito (10 x 10 x 0.8 cm) previamente acondicionada en el compartimento catódico (cátodo) y 1000 ml de agua desionizada como solución catolítica (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 (poliuretano, grafito y nanofibras de carbono), y 1000 ml de agua residual del rastro municipal como sustrato. Se utilizó una membrana de intercambio catiónico pre-hidratada (NaCl 5%, 12 h) para separar los compartimentos (CXM-200S, marca International Membranes Inc.). El monitoreo de las celdas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital (Fluke 289 - Trendcapture) con el cual se determinó el voltaje de cada celda 2 veces al día (mañana y noche) durante toda la reacción (12 días), empleando una resistencia externa de 1 k Ω para cerrar el circuito. Finalmente se determinó la demanda química de oxígeno (DQO) de forma diaria (NMX-AA-030/1-SCFI-2012).

2.6. 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 50×10^{-3} y 100 k Ω , una vez estabilizado el voltaje.

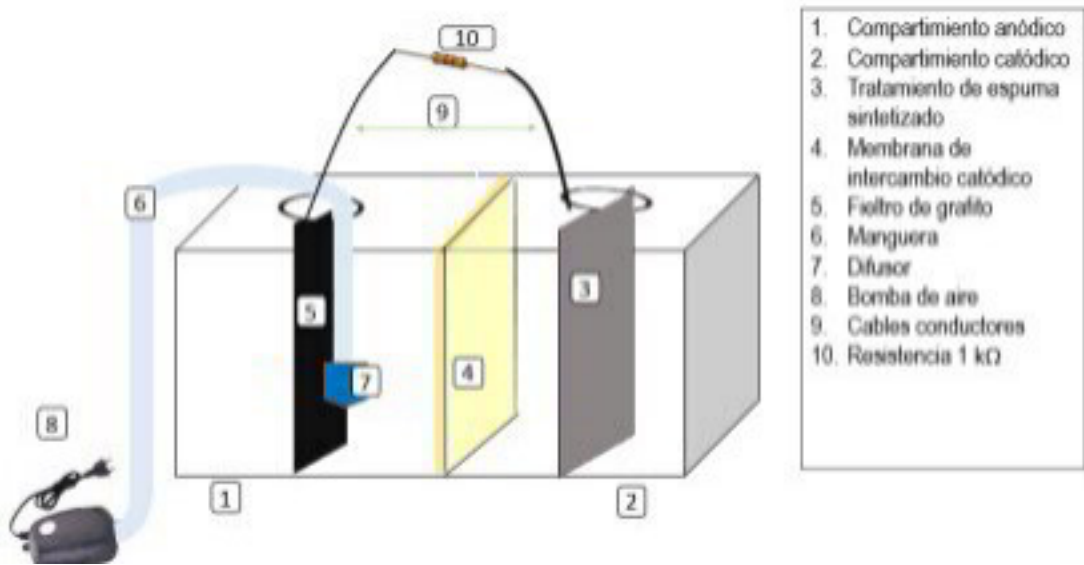


Figura 3. Configuración de las CCM utilizadas en los experimentos.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Voltaje

Como se muestra en la Fig. 4, el voltaje máximo generado fue de 180.03 mV, 175.90 mV y 175.80 mV correspondiente a los compósitos de PU/CNF 1%, PU y PU/Grafito 0.5%, respectivamente. Estos resultados indican que el compuesto de PU/CNF 1% mostró el mejor desempeño en términos de generación de voltaje, lo que sugiere que la incorporación de nanofibras de carbono (CNF) en la matriz de poliuretano (PU) incrementa la capacidad de conducción eléctrica. Este comportamiento puede atribuirse a las propiedades de las nanofibras de carbono, que ofrecen una mayor área de superficial y conductividad en comparación con otros materiales convencionales (Feng et al., 2014).

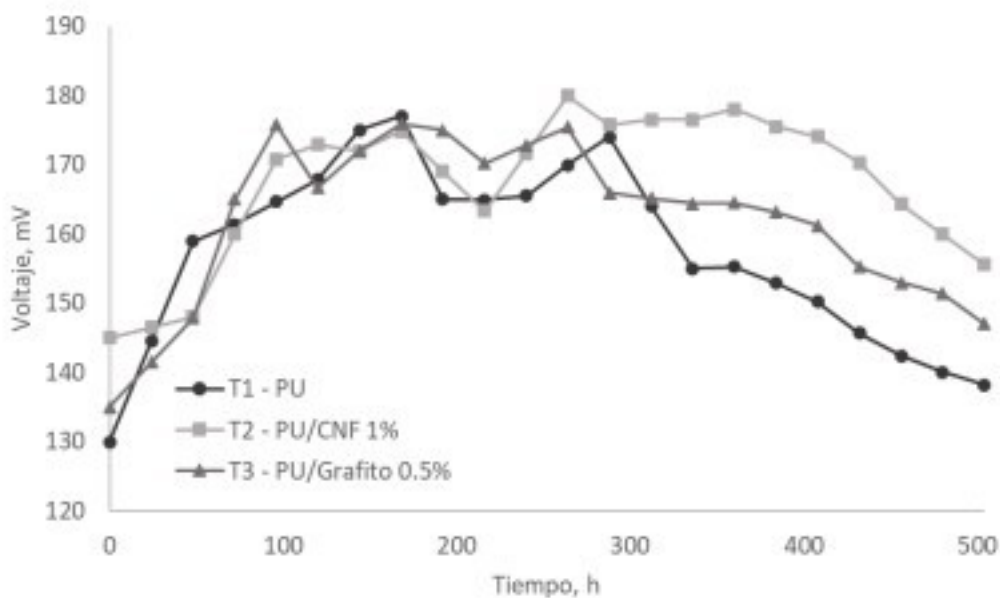


Figura 4. Voltaje generado por las CCM empacada con los compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 0.5% como ánodos.

3.2. Densidad de potencia

En la Fig. 5, se observa que la densidad de potencia máxima alcanzada por los ánodos de PU/CNF 1%, PU y PU/Grafito 0.5% fue de 32.4 mW/m³, 31.33 mW/m³ y 30.90 mW/m³, respectivamente. Estos resultados son inferiores a lo reportado por Liu et al., (2022) (486.6 mW/m³), pero superiores a lo obtenido por Chaijak et al., (2019) (3.26 μW/m³). Lo anterior, confirma el efecto que tienen los materiales incrustados (grafito y CNF) en el desempeño global de las CCM, al incrementar la conductividad eléctrica (PU/Grafito 0.5%, 1.54×10^{-9} S/m; PU/CNF 1%, 1×10^{-9} S/m) y el área superficial de los ánodos sintetizados.

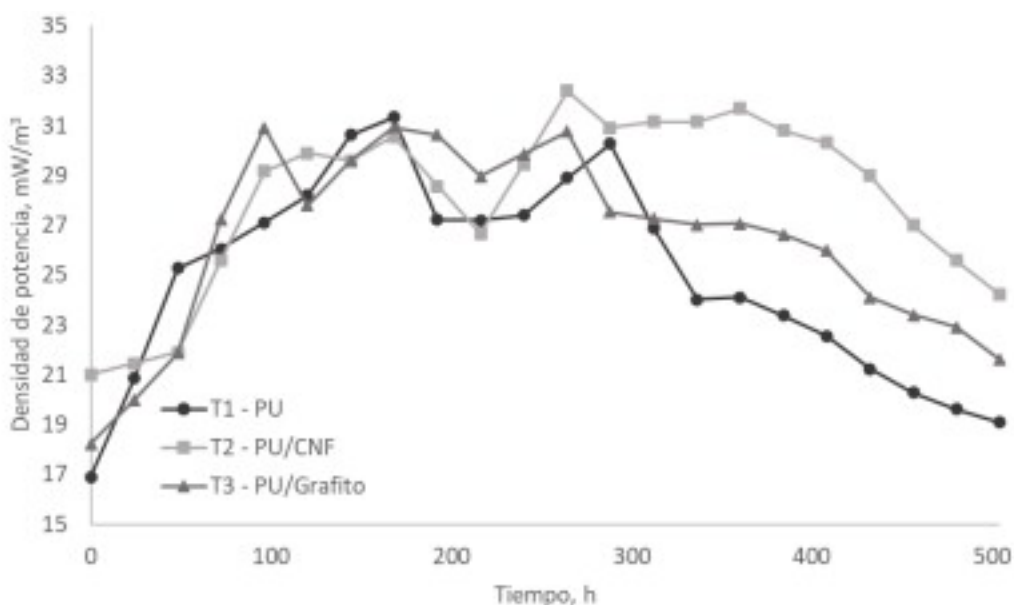


Figura 5. Densidad de potencia generada por las CCM empacada con los compósitos de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 0.5% como ánodos.

3.3. Eficiencia de remoción de DQO

La Fig. 6 muestra la tasa de remoción de DQO en las CCM empacadas con los materiales sintetizados. Se puede observar que los compósitos de PU/CNF 1%, PU/Grafito 0.5% y PU lograron remover un 99.22%, 94.18% y 92.57%,

respectivamente. Lo anterior, demuestra la alta eficiencia de los compósitos para la remoción de materia orgánica en el sistema, destacando el rendimiento del compósito de PU/CNF 1%, que alcanzó una remoción casi total. Este comportamiento podría estar relacionado con la mayor área superficial proporcionada por las nanofibras de carbono (CNF), lo que favorece la colonización microbiana y, por lo tanto, la degradación de los compuestos orgánicos presentes en el efluente (Christensson & Welander, 2004). En comparación, el material de PU puro mostró una eficiencia menor, lo que resalta la importancia de desarrollar nuevos materiales anódicos para lograr una remoción más eficaz de los contaminantes orgánicos (Banerjee et al., 2022).

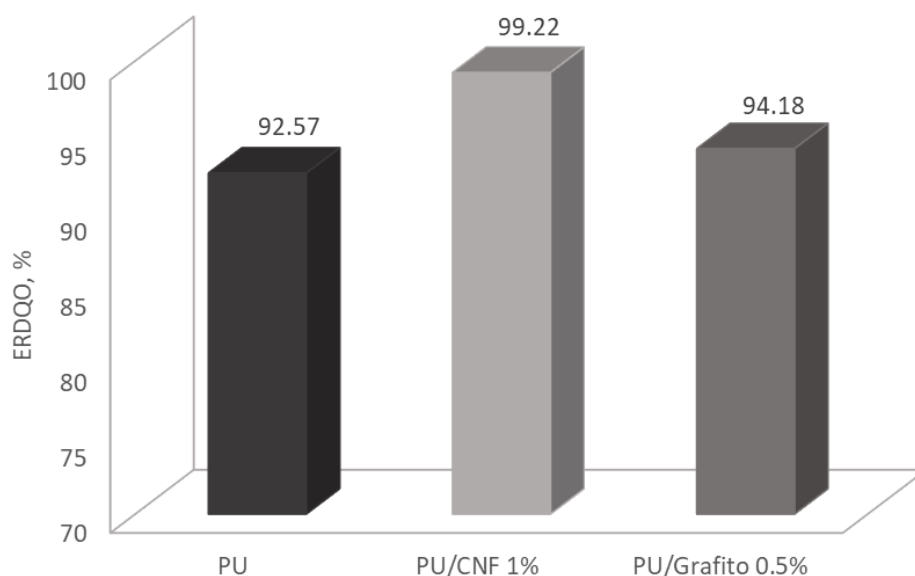


Figura 6. Eficiencia de remoción de DQO al final del ciclo operativo de las CCM.

3.4. Eficiencia coulombica

La eficiencia coulombica (EC) obtenida por los compósitos sintetizados a base de PU, PU/CNF 1% y PU/Grafito 0.5% fue de 0.4726%, 0.4677% y 0.4778%, respectivamente (Fig. 7). Estos resultados muestran una baja eficiencia de

conversión de electrones en todos los casos, lo que podría estar relacionado con la limitada capacidad de los materiales empleados para generar corriente eléctrica en el SBE. También, es posible observar que la diferencia entre los compósitos es mínima, sugiriendo que, en términos de eficiencia coulombica, la adición de nanofibras de carbono o grafito no genera una mejora significativa en el rendimiento electroquímico comparado con el poliuretano puro. Es importante señalar que la EC está influenciada no solo por la conductividad de los materiales, sino también por otros factores, como la cinética de la reacción en el ánodo y la disponibilidad de sustratos para la transferencia de electrones (Vélez-Pérez et al., 2020; Ye et al., 2020). Lo anterior, sugiere la necesidad de optimizar la composición de los compósitos o de explorar otros métodos para mejorar la eficiencia coulombica en aplicaciones bioelectroquímicas.

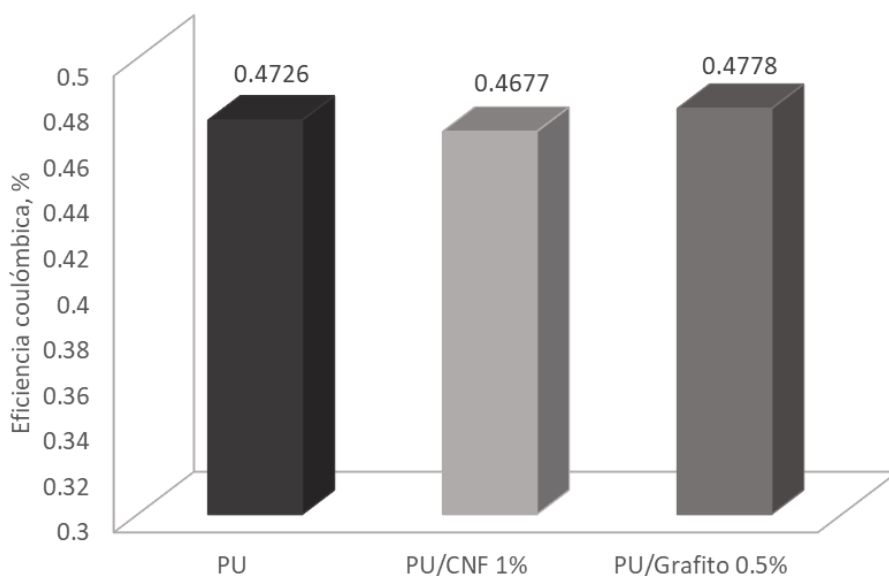


Figura 7. Eficiencia coulombica obtenida en las CCM.

3.5. Curvas de polarización y potencia

La Fig. 8 muestra la caracterización electroquímica de la CCM que produjo un mejor desempeño (PU/Grafito 0.5%) durante la realización de los experimentos. La densidad de potencia máxima alcanzada fue de 26.06 mW/m³ a una densidad de corriente de 74.46 mA/m³. Estos valores indican el desempeño máximo posible de la CCM, una vez sea igualado el valor de la resistencia externa al valor de la resistencia interna (3204.54 Ω, valor calculado a partir de la pendiente de la curva de potencial) del sistema, manteniendo la misma configuración, sustrato y materiales utilizados para su construcción y operación (Kim et al., 2021; Rossi y Logan, 2020).

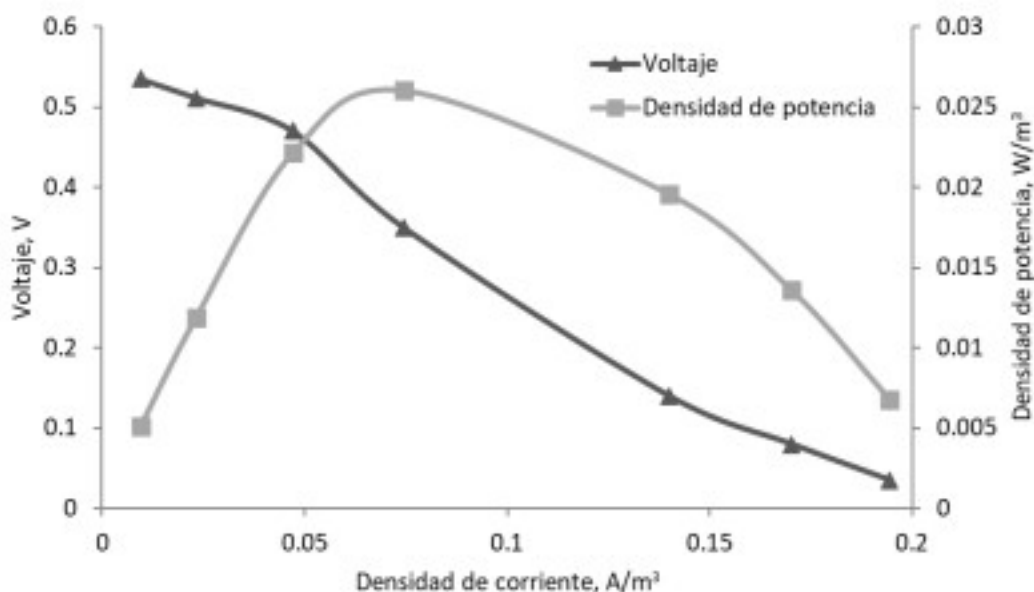


Figura 8. Curvas de polarización y densidad de potencia en función de la densidad de corriente generada en la CCM empacada con un compuesto de PU/Grafito 0.5% como ánodo.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad de utilizar compósitos de poliuretano, grafito y nanofibras de carbono en celdas de combustible microbianas de doble compartimento para la generación de energía eléctrica y remediación de efluentes contaminados. El bajo costo de producción de este tipo de materiales (considerando los bajos porcentajes de carga de grafito y CNF en la matriz de poliuretano) hacen aún más atractivo su uso y potencial escalamiento. A pesar de esto, la incrustación de otros materiales más conductores o la funcionalización de los materiales ya utilizados podría incrementar considerablemente la conductividad eléctrica de los compósitos, disminuyendo la resistencia interna del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banerjee, A., Calay, R. K., & Mustafa, M. (2022). Review on material and design of anode for microbial fuel cell. *Energies*, 15(6), 2283.
- Çetinkaya, A., & Bilgili, L. (2022). Treatment of slaughterhouse industry wastewater with ultrafiltration membrane and evaluation with life cycle analysis. *Environmental Research and Technology*, 5(3), 197-201.
- Chaijak, P., Sato, C., Lertworapreecha, M., Sukkasem, C., Boonsawang, P., & Paucar, N. (2019). Potential of biochar-anode in a ceramic-separator microbial fuel cell (CMFC) with a laccase-based air cathode. *Pol. J. Environ. Stud*, 29(1), 499-503.
- Christensson, M., & Welander, T. (2004). Treatment of municipal wastewater in a hybrid process using a new suspended carrier with large surface area. *Water Science and Technology*, 49(11-12), 207-214.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental chemistry letters*, 17, 145-155.
- Feng, L., Xie, N., & Zhong, J. (2014). Carbon nanofibers and their composites: a review of synthesizing, properties and applications. *Materials*, 7(5), 3919-3945.
- 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.
- Gude, V. G., Kokabian, B., & Gadhamshetty, V. (2013). Beneficial bioelectrochemical systems for energy, water, and biomass production. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 6, 2.
- Gul, M. M., & Ahmad, K. S. (2019). Bioelectrochemical systems: sustainable bio-energy powerhouses. *Biosensors and Bioelectronics*, 142, 111576.

- Hamelers, H. V., Ter Heijne, A., Sleutels, T. H., Jeremiasse, A. W., Strik, D. P., & Buisman, C. J. (2010). New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied microbiology and biotechnology*, *85*, 1673-1685.
- Heidrich, E. S., Dolfing, J., Scott, K., Edwards, S. R., Jones, C., & Curtis, T. P. (2013). Production of hydrogen from domestic wastewater in a pilot-scale microbial electrolysis cell. *Applied microbiology and biotechnology*, *97*, 6979-6989.
- Hellal, M. S., El-Kamah, H. M., & Doma, H. S. (2024). High-performance internal circulation anaerobic granular sludge reactor for cattle slaughterhouse wastewater treatment and simultaneous biogas production. *BMC biotechnology*, *24*(1), 29.
- 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.
- Ivase, T. J. P., Nyakuma, B. B., Oladokun, O., Abu, P. T., & Hassan, M. N. (2020). Review of the principal mechanisms, prospects, and challenges of bioelectrochemical systems. *Environmental progress & sustainable energy*, *39*(1), 13298.
- Ki, D., Popat, S. C., & Torres, C. I. (2016). Reduced overpotentials in microbial electrolysis cells through improved design, operation, and electrochemical characterization. *Chemical Engineering Journal*, *287*, 181-188.
- Kim, B., Chang, I. S., Dinsdale, R. M., & Guwy, A. J. (2021). Accurate measurement of internal resistance in microbial fuel cells by improved scanning electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, *366*, 137388.
- Kundu, A., Sahu, J. N., Redzwan, G., & Hashim, M. A. (2013). An overview of cathode material and catalysts suitable for generating hydrogen in

microbial electrolysis cell. *international journal of hydrogen energy*, 38(4), 1745-1757.

- Liu, S. H., Lin, H. H., & Lin, C. W. (2022). Gaseous isopropanol removal in a microbial fuel cell with deoxidizing anode: Performance, anode characteristics and microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127200.
- Liu, X. W., Li, W. W., & Yu, H. Q. (2014). Cathodic catalysts in bioelectrochemical systems for energy recovery from wastewater. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7718-7745.
- Logan, B. E., Call, D., Cheng, S., Hamelers, H. V., Sleutels, T. H., Jeremiassen, A. W., & Rozendal, R. A. (2008). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. *Environmental science & technology*, 42(23), 8630-8640.
- 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.
- Lu, L., & Ren, Z. J. (2016). Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: A state of the art review. *Bioresource technology*, 215, 254-264.
- Mara, D. (2013). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Routledge.
- Musa, M. A., Idrus, S., Hasfalina, C. M., & Daud, N. N. N. (2018). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion performance of mesophilic (UASB) reactor using cattle slaughterhouse wastewater as substrate. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2220.
- Ng, M., Dalhatou, S., Wilson, J., Kamdem, B. P., Temitope, M. B., Paumo, H. K., Djelal, H., Assadi, A.A., Nguyen-Tri, P., & Kane, A. (2022). Characterization of slaughterhouse wastewater and development of treatment techniques: a review. *Processes*, 10(7), 1300.

- 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. Secretaría de Economía: Ciudad de México, México, 2011. Available online: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA030-2-SCFI2011.pdf>
- Palomares-Rodríguez, C., Martínez-Guido, S. I., Apolinar-Cortés, J., del Carmen Chávez-Parga, M., García-Castillo, C. C., & Ponce-Ortega, J. M. (2017). Environmental, technical, and economic evaluation of a new treatment for wastewater from slaughterhouses. *International Journal of Environmental Research*, 11(4), 535-545.
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnology*, 23(6), 291-298.
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745-756.
- Rossi, R., & Logan, B. E. (2020). Unraveling the contributions of internal resistance components in two-chamber microbial fuel cells using the electrode potential slope analysis. *Electrochimica Acta*, 348, 136291.
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of power sources*, 356, 225-244.
- Santoro, C., Garcia, M. J. S., Walter, X. A., You, J., Theodosiou, P., Gajda, I., Obata, O., Winfield, J., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2020). Urine in bioelectrochemical systems: an overall review. *ChemElectroChem*, 7(6), 1312-1331.
- Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Obaideen, K., Elsaid, K., Wilberforce, T., Maghrabie, H. M., & Olabi, A. G. (2021). Progress in plant-based

bioelectrochemical systems and their connection with sustainable development goals. *Carbon Resources Conversion*, 4, 169-183.

- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A., & Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 101, 60-81.
- Tartakovsky, B., Manuel, M. F., Wang, H., & Guiot, S. R. (2009). High rate membrane-less microbial electrolysis cell for continuous hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 34(2), 672-677.
- Terán Hilaes, R., Sánchez Vera, F. P., Colina Andrade, G. J., Tejada Meza, K., García, J. C., & Pacheco Tanaka, D. A. (2022). Continuous cultivation of microalgae in cattle slaughterhouse wastewater treated with hydrodynamic cavitation. *Water*, 14(8), 1288.
- Van Eerten-Jansen, M. C., Heijne, A. T., Buisman, C. J., & Hamelers, H. V. (2012). Microbial electrolysis cells for production of methane from CO₂: long-term performance and perspectives. *International Journal of Energy Research*, 36(6), 809-819.
- 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.
- Wilberforce, T., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., & Olabi, A. G. (2021). Value added products from wastewater using bioelectrochemical systems: Current trends and perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101737.
- Xie, X., Criddle, C., & Cui, Y. (2015). Design and fabrication of bioelectrodes for microbial bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science*, 8(12), 3418-3441.

- Yan, W., Xiao, Y., Yan, W., Ding, R., Wang, S., & Zhao, F. (2019). The effect of bioelectrochemical systems on antibiotics removal and antibiotic resistance genes: a review. *Chemical Engineering Journal*, 358, 1421-1437.
- 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.
- Yu, Y. Y., Zhai, D. D., Si, R. W., Sun, J. Z., Liu, X., & Yong, Y. C. (2017). Three-dimensional electrodes for high-performance bioelectrochemical systems. *International journal of molecular sciences*, 18(1), 90.
- Zhang, X., Li, X., Zhao, X., & Li, Y. (2019). Factors affecting the efficiency of a bioelectrochemical system: a review. *RSC advances*, 9(34), 19748-19761.
- Zheng, T., Li, J., Ji, Y., Zhang, W., Fang, Y., Xin, F., Dong, W., Wei, P., Ma, J., & Jiang, M. (2020). Progress and prospects of bioelectrochemical systems: electron transfer and its applications in the microbial metabolism. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 10.