

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**MODIFICACIÓN DE ÁNODOS DE ACERO
INOXIDABLE PARA AUMENTAR LA GENERACIÓN DE
POTENCIA EN UNA BIOCELDA DE SEDIMENTO DE
COMBUSTIBLE**

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

ING. JORGE ROBERTO ARENAS DOMÍNGUEZ

DIRECTORES: DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS
DRA. LORENA MAGALLÓN CACHO

CUERNAVACA, MORELOS

MAYO DE 2026

AGRADECIMIENTOS

Realizar esta tesis representó un camino de retos, disciplina y crecimiento personal. Al concluir esta etapa, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible este logro.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis directores de tesis, Dr. Alberto Armando Álvarez Gallegos y Dra. Lorena Magallón Cacho, por su guía, paciencia y confianza durante todo este proceso. Su orientación académica fue esencial para la formación que hoy culmino.

Extiendo mi agradecimiento a mi comité de tesis y a los profesores que me impartieron clases durante la maestría. Cada aportación, clase, comentario y retroalimentación contribuyó a mi desarrollo académico y fortaleció las bases necesarias para realizar esta investigación.

Agradezco también al CIICAp por brindarme el espacio e infraestructura necesarios. Cada experimento, medición y análisis fue realizado por mí de manera individual, y este trabajo refleja el esfuerzo, dedicación y constancia que mantuve durante todo el proyecto. Trabajar solo me enseñó autonomía, responsabilidad y la confianza en mis propias capacidades científicas.

A mis compañeros y amigos, gracias por su apoyo fuera del laboratorio, por escucharme, animarme y recordarme que incluso en los días más exigentes valía la pena continuar.

Finalmente, agradezco profundamente a mi familia. Gracias por su amor, paciencia y por creer en mí incluso cuando las circunstancias se tornaron difíciles. Su apoyo emocional fue mi mayor fuerza para avanzar y culminar este logro.

Dedicatoria

A mi madre, por su amor incondicional, su fortaleza y por ser mi mayor inspiración. Gracias por cada palabra de apoyo, por tus sacrificios silenciosos y por enseñarme que incluso en los momentos más difíciles siempre es posible avanzar. Este logro también es tuyo.

A mis abuelos, quienes me brindaron su apoyo y cariño en los primeros pasos de este camino. Gracias por creer en mí cuando apenas comenzaba este proyecto. Su respaldo inicial fue la base que me permitió llegar hasta aquí.

Con todo mi cariño y gratitud, para ustedes.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	2
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	3
1.1. HIPÓTESIS	5
1.2. JUSTIFICACIÓN	5
1.3. OBJETIVOS	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Particulares	6
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DE LAS BIOCELDA DE SEDIMENTO COMBUSTIBLE ...	8
INTRODUCCIÓN	8
2.1. BIOCELDA DE SEDIMENTO COMBUSTIBLE (BCSC)	10
2.2. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA QUÍMICA Y ELÉCTRICA EN UNA BCSC.....	10
2.2.1. Reacciones Redox Involucradas	11
2.3. PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS CLAVE	12
2.3.1. Voltaje	12
2.3.2. Corriente	13
2.3.3. Densidad de Corriente	13
2.3.4. Densidad de Potencia	14
2.3.5. Punto de Activación	14
2.3.6. Resistencia Óhmica	15
2.3.7. Transferencia de Masa	15
2.4. COMPONENTES DE LA BCSC	16
2.4.1. Ánodo	16
2.4.2. Cátodo	17
2.4.3. Catolito	18
2.4.4. Anolito	18
2.4.5. Temperatura	18
2.4.6. Microorganismos	19
2.4.7. Desechos Orgánicos	19
2.5. REGIONES DE UNA CURVA DE POLARIZACIÓN	20
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	24

3.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.1.1. Materiales y Diseño del Sistema Experimental	26
3.1.1.1. Dimensiones y Características del Recipiente Utilizado	26
3.1.1.2. Cátodos.....	26
3.1.1.3. Ánodos.....	27
3.1.2. Procedencia del Sedimento	30
3.1.3. Preparación de la Materia Orgánica	30
3.1.3.2. Adición de Materia Orgánica en el Anolito.....	32
3.1.4. Montaje de las BCSC	32
3.1.5. Caracterización Electroquímica	35
3.1.6. Curvas de Densidad de Potencia.....	35
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1. DESEMPEÑO ELECTROQUÍMICO DE LAS BCSC	37
4.2. CURVAS DE ESTABILIZACIÓN	37
4.3. DENSIDAD DE POTENCIA	39
4.4. ESTUDIO DE POLARIZACIÓN	42
4.5. RESISTENCIA ÓHMICA	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Configuración de las bioceldas de sedimento.....	33
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de polarización típica de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés).	21
Figura 2. Representación esquemática del montaje de una BCSC y los elementos que la conforman.	25
Figura 3. Envase de tereftalato de polietileno (PET) de 500 ml.	26
Figura 4. Representación esquemática de los cátodos de fibra de carbón unidireccional y del montaje en un palillo de madera a 6.3 cm de la base.	27
Figura 5. Dimensiones y proceso de limpieza del ánodo.	28
Figura 6. Imagen y representación esquemática del tratamiento térmico por flama de un electrodo de acero inoxidable.	29
Figura 7. Proceso de preparación y montaje de un ánodo de acero inoxidable.	29
Figura 8. Ubicación de la zona donde se obtuvo el sedimento en la laguna de Coatetelco.	30
Figura 9. Molino de café para procesado de materia orgánica.	31
Figura 10. Tamices estándar de laboratorio 304 SUS.	31
Figura 11. Ejemplo del montaje de una BCSC montada en el laboratorio.	34
Figura 12. Curvas de estabilización de BCSC con electrodo de Fe_2O_3	38
Figura 13. Curvas de estabilización de BCSC con electrodo de nanotubos de carbono.	38
Figura 14. Curvas de densidad de potencia de BCSC con electrodo de Fe_2O_3 y H_2SO_4 , pH 2.	40
Figura 15. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.	40
Figura 16. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 , pH 2.	41
Figura 17. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.	41

Figura 18. Curvas de polarización de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 , pH 2.	43
Figura 19. Curva de polarización de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.....	43
Figura 20. Curva de polarización de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 , pH 2.	44
Figura 21. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.	44
Figura 22. Región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 , pH 2.	45
Figura 23. Región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.	46
Figura 24. Descenso de la región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.	46
Figura 25. Región de resistencia óhmica de Bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 , pH 2.....	47
Figura 26. Región de resistencia óhmica de Bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 y Na_2SO_4 pH 2.....	48
Figura 27. Descenso de la región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.	48
Figura 28. Curva de densidad de potencia biocelda Fe_2O_3 de 2 cm^2 , cátodo sumergido y biocelda con tratamiento térmico Fe_2O_3 de 2 cm^2 con 1/3 del cátodo expuesto, $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, pH 2.....	50
Figura 29. Curva de densidad de corriente biocelda Fe_2O_3 de 2 cm^2 , cátodo sumergido y biocelda con tratamiento térmico Fe_2O_3 de 2 cm^2 con 1/3 del cátodo expuesto, $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, pH 2.....	51
Figura 30. Resistencia óhmica en bioceldas Fe_2O_3 de 2 cm^2 : cátodo sumergido y con 1/3 del cátodo expuesto, $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, pH 2.....	52
Figura 31. Resistencia óhmica comparativa de bioceldas con Fe_2O_3 de 2 cm^2 utilizando Sargazo y Cangrejo (12 y 60 mesh) con y sin exposición parcial del cátodo, $0.01\text{ M H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, pH 2.....	52

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto de la modificación del ánodo, el uso de materia orgánica residual y la optimización del catolito sobre la generación de energía en bioceldas de sedimento de combustible (BCSC). Se empleó sedimento de la Laguna de Coatetelco (Morelos) como anolito, mientras que los ánodos fueron elaborados con malla de acero inoxidable de 2 cm² sometidas a tratamiento térmico por flama a 1100 °C, para inducir la formación de óxidos de hierro (Fe₂O₃). También se prepararon ánodos modificados con nanotubos de carbono. El cátodo, fabricado con fibra de carbono, se evaluó en dos condiciones: completamente sumergido y con un tercio expuesto al oxígeno atmosférico. El catolito se acidificó con H₂SO₄ y posteriormente se enriqueció con Na₂SO₄ para incrementar la conductividad iónica y reducir la resistencia interna. Como residuo orgánico se emplearon exoesqueleto de cangrejo y sargazo pelágico, molidos a dos tamaños de partícula (12 y 60 mesh) para analizar su influencia en la actividad microbiana y la conductividad del sedimento.

Los resultados mostraron que los ánodos modificados (Fe₂O₃) presentaron un desempeño superior al de los nanotubos de carbono, alcanzando el estado de equilibrio en menor tiempo y generando mayores densidades de potencia. La combinación Fe₂O₃ + sargazo 60 mesh + H₂SO₄/Na₂SO₄ produjo la densidad de potencia más alta (1026 mW·m⁻²), y reducciones significativas en la resistencia óhmica hasta 173 Ω. Además, la exposición parcial del cátodo (1/3 fuera del agua) incrementó la densidad de potencia aproximadamente un 30 %, al mejorar la disponibilidad de oxígeno y disminuir el sobrepotencial catódico. En conjunto, los resultados demostraron que la modificación térmica de electrodos, la valorización de residuos orgánicos y la optimización del catolito son estrategias simples y de bajo costo para mejorar la eficiencia de las BCSC, confirmando su potencial como una alternativa sustentable para la generación de energía.

ABSTRACT

In this study, the effect of anode modification, the use of residual organic matter, and catholyte optimization on power generation in sediment microbial fuel cells (SMFCs) was evaluated. Sediment collected from Coatetelco Lagoon (Morelos, Mexico) was used as the anolyte. The anodes were made from 2 cm² stainless steel mesh and subjected to flame thermal treatment at 1100 °C to induce the formation of iron oxides (Fe₂O₃). In addition, anodes modified with carbon nanotubes were prepared for comparison. The cathode, made of carbon fiber, was evaluated under two configurations: fully submerged and partially exposed to atmospheric oxygen, with approximately one-third of the electrode positioned above the liquid phase. The catholyte was acidified with H₂SO₄ and subsequently enriched with Na₂SO₄ to increase ionic conductivity and reduce internal resistance. Crab exoskeleton and pelagic sargassum were used as organic substrates, ground into two particle sizes (12 and 60 mesh) to assess their influence on microbial activity and sediment conductivity.

The results obtained showed that Fe₂O₃-modified anodes exhibited superior performance compared to carbon nanotube-modified anodes, reaching steady-state conditions in a shorter time and producing higher power densities. The combination of Fe₂O₃ + sargassum at 60 mesh + H₂SO₄/Na₂SO₄ produced the highest power density (1026 mW·m⁻²), along with significant reductions in ohmic resistance down to 173 Ω. Furthermore Additionally, partial cathode exposure (one-third above the water surface) increased the power density by approximately 30%, due to improved oxygen availability and reduced cathodic overpotential. Overall, In summary, the results obtained demonstrate indicate that thermal modification of the electrodes, the valorization recovery of organic residues waste, and optimization of the catholyte are simple and low-cost strategies to enhance the performance of SMFCs, confirming their potential as a sustainable alternative for energy generation.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y el desarrollo industrial han incrementado la demanda energética mundial, la cual continúa dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles. Este modelo energético ha provocado elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, acelerando el cambio climático y evidenciando la urgencia de transitar hacia fuentes de energía sostenible, limpia y de bajo costo. En este contexto, las bioceldas de combustible microbianas (MFC), y en particular las bioceldas de sedimento de combustible (BCSC), han surgido como una alternativa prometedora al permitir generar electricidad a partir de la degradación de materia orgánica y, simultáneamente, tratar aguas contaminadas [1], [2].

Las BCSC utilizan sedimentos naturales como medio anódico. En ellas, los microorganismos electrogénicos oxidan la materia orgánica y transfieren electrones al ánodo, generando una corriente eléctrica en condiciones anaerobias. Sin embargo, su eficiencia energética aún es limitada debido a factores como la baja conductividad iónica del sedimento, la escasa adherencia bacteriana al electrodo y la limitada disponibilidad de materia orgánica[3], [4], [5]. Por esta razón, mejorar la transferencia electrónica mediante la optimización del diseño y de los materiales de los electrodos se ha convertido en una línea de investigación clave [6], [7].

En este sentido, el sargazo pelágico (*Sargassum* spp.) y los residuos de crustáceos como el exoesqueleto de cangrejo se perfilan como fuentes alternativas de materia orgánica aprovechables en las BCSC. El sargazo, cuya acumulación masiva en las costas del Caribe mexicano ha provocado impactos ecológicos, sanitarios y económicos negativos. Contiene

polisacáridos y compuestos fácilmente degradables que pueden servir como sustrato energético para los microorganismos electroactivos [8], [9], [10], [11]. Asimismo, el exoesqueleto de cangrejo, rico en quitina, puede ser degradado por bacterias especializadas, generando compuestos orgánicos fermentables que facilitan la producción de energía eléctrica en sistemas bioelectroquímicos [12].

El rendimiento de las BCSC también depende del tipo de material empleado en los electrodos, especialmente en el ánodo, donde ocurre la oxidación bacteriana. El acero inoxidable destaca por su bajo costo, resistencia mecánica y buena conductividad eléctrica; sin embargo, su superficie pasiva limita la formación de biopelículas bacterianas. Estudios recientes han demostrado que la modificación del acero inoxidable mediante tratamiento térmico por flama induce la formación de óxidos de hierro (Fe_2O_3), mejorando su biocompatibilidad y aumentando la eficiencia de transferencia electrónica [13]. De igual modo, el uso de nanomateriales como los nanotubos de carbono ha mostrado un efecto positivo en la generación de energía debido a su alta área superficial, conductividad eléctrica y estructura porosa, que favorecen la colonización microbiana y la transferencia de electrones [14].

En conjunto, la integración de electrodos modificados con óxidos metálicos, el uso de residuos orgánicos abundantes como sargazo y exoesqueletos marinos, así como la optimización de las condiciones electroquímicas del sistema constituyen una vía prometedora para incrementar la eficiencia energética de las bioceldas de sedimento de combustible. Este trabajo se enmarca en la búsqueda de tecnologías sostenibles que contribuyan a resolver los retos energéticos y ambientales actuales.

1.1. HIPÓTESIS

La modificación térmica por flama del ánodo de acero inoxidable, mediante la formación de óxidos de hierro (Fe_2O_3), incrementa la biocompatibilidad y la eficiencia de transferencia electrónica entre las bacterias electrogénicas y el electrodo. En conjunto con la adición de materia orgánica (sargazo pelágico o exoesqueleto de cangrejo) como sustrato, se reduce la resistencia óhmica interna y aumenta significativamente la densidad de potencia generada en las bioceldas de sedimento de combustible.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La investigación y desarrollo de las BCSC representa una oportunidad única para producir electricidad de manera sostenible, aprovechando la actividad microbiana natural existente en los sedimentos de diferentes cuerpos de agua. Este tipo de sistemas no solo permite generar energía de una forma no convencional, sino que ofrece un enfoque innovador para atender problemáticas ambientales relacionadas con la acumulación de materia orgánica y otros contaminantes en los sedimentos.

Sin embargo, una de las principales limitaciones de las BCSC es la baja generación de potencia, la cual depende en gran medida del tipo de material empleado en el ánodo. El acero inoxidable es un material atractivo por su bajo costo, resistencia mecánica y buena conductividad, pero su superficie pasiva limita la formación de una biopelícula bacteriana y la eficiencia en la transferencia de electrones. Por ello, resulta necesario explorar estrategias que mejoren las propiedades electroquímicas de este material, sin comprometer su viabilidad económica.

La modificación de ánodos de acero inoxidable se plantea como una alternativa viable para optimizar el rendimiento de las BCSC. A través de un

tratamiento térmico por flama es posible mejorar la biocompatibilidad y la conductividad superficial del ánodo, favoreciendo la formación de biopelículas y una mayor eficiencia en la transferencia de carga. Esto, a su vez, puede traducirse en un aumento significativo en la generación de potencia.

Llevar a cabo esta investigación contribuye a generar conocimiento aplicado sobre cómo mejorar la eficiencia de los materiales utilizados en las BCSC, promoviendo el desarrollo de tecnologías energéticas limpias y de bajo costo. Adicionalmente, fortalece el enfoque de biorremediación ambiental, al utilizar sedimentos como fuente de energía, con potencial aplicación en zonas con cuerpos de agua contaminados.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la modificación térmica por flama del ánodo de acero inoxidable y del uso de materia orgánica residual (sargazo pelágico y exoesqueleto de cangrejo), sobre la generación de potencia, así como el desempeño electroquímico de bioceldas de sedimento de combustible. Lo anterior con el propósito de optimizar la transferencia de electrones, reducir la resistencia óhmica interna y mejorar la eficiencia energética del sistema.

1.3.2. Objetivos Particulares

- Modificar los electrodos de acero inoxidable mediante un tratamiento térmico por flama, con el propósito de inducir la formación de óxidos de hierro (Fe_2O_3) en su superficie, favoreciendo la afinidad bacteriana y mejorando la transferencia de electrones hacia el ánodo.

- Evaluar y comparar la generación de potencia en bioceldas de sedimento de combustible (BCSC) en función del tipo de ánodo modificado, así como la materia orgánica utilizada como sustrato, determinando el impacto de estas variables en el desempeño electroquímico del sistema.
- Analizar el efecto del tipo y tamaño de partícula de la materia orgánica (12 y 60 malla) sobre la eficiencia de conversión bioelectroquímica, así como la densidad de potencia generada en las BCSC.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DE LAS BIOCELDAS DE SEDIMENTO COMBUSTIBLE

INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda energética mundial y la dependencia de combustibles fósiles han impulsado la búsqueda de fuentes alternativas de energía sostenibles y de bajo impacto ambiental. En este contexto, las bioceldas de sedimento de combustible (BCSC) se han consolidado como una tecnología prometedora, capaz de convertir la energía química contenida en la materia orgánica del sedimento en energía eléctrica, mediante la actividad metabólica de microorganismos electrogénicos [1], [7].

En las BCSC, los microorganismos oxidan compuestos orgánicos y transfieren los electrones liberados hacia el ánodo, mientras que en el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción de oxígeno (ORR). Sin embargo, su eficiencia se ve limitada por la baja conductividad del sedimento, la resistencia óhmica interna y la cinética lenta de la ORR, lo que reduce la densidad de potencia generada [4], [15].

Diversos estudios han demostrado que la modificación del ánodo y el uso de sustratos orgánicos complementarios pueden mejorar el desempeño electroquímico del sistema [16]. Se ha reportado que el tratamiento térmico por flama del acero inoxidable forma óxidos de hierro (Fe_2O_3) que aumentan la biocompatibilidad y la transferencia electrónica [16]. De igual manera, se señaló que los ánodos modificados con Fe_2O_3 favorecen el crecimiento de bacterias electrogénicas, elevando la generación de potencia [13].

Además, la adición de biomasa orgánica residual, como quitina proveniente de exoesqueletos de crustáceos o sargazo pelágico (*Sargassum* spp.), aporta

carbono y nutrientes que estimulan la actividad bacteriana y reducen la resistencia interna del sistema [17], [18]. En este artículo se demostraron que el uso de quitina en sedimentos contaminados incrementa significativamente la potencia generada al disminuir la resistencia interna y mejorar la conductividad iónica [19].

Asimismo, la posición del cátodo influye notablemente en el rendimiento del sistema. Se observó que al exponer aproximadamente un tercio del cátodo fuera del agua, la densidad de potencia aumentó, debido a una mayor disponibilidad de oxígeno en la interfase aire-agua y a una reducción de la resistencia por difusión en la capa de Nernst, lo que favorece la reacción de reducción de oxígeno y mejora la eficiencia global de la celda.

La incorporación de sulfato de sodio (Na_2SO_4) al catolito ha mostrado efectos positivos al aumentar la conductividad iónica y estabilizar el pH, favoreciendo la reducción de oxígeno y mejorando la respuesta lineal en la región óhmica de las curvas de polarización.

Por tanto, comprender los fundamentos electroquímicos y biológicos que rigen el funcionamiento de las BCSC es esencial para su optimización. En este trabajo se evalúa el efecto de ánodos modificados con óxidos de hierro, el uso de materia orgánica residual (sargazo y exoesqueleto de cangrejo) y la posición del cátodo parcialmente expuesto, junto con la composición del catolito ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$), sobre la resistencia interna y la densidad de potencia generada, con el objetivo de optimizar la eficiencia energética y promover el aprovechamiento de residuos orgánicos marinos en sistemas bioelectroquímicos sostenibles.

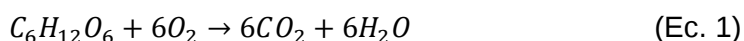
2.1. BIOCELDAS DE SEDIMENTO COMBUSTIBLE (BCSC)

Esta es una variante de las celdas de combustible microbianas, las cuales utilizan la materia orgánica contenida en los sedimentos como sustrato para las bacterias. Las BCSC convierten la energía química de la materia orgánica contenida en los sedimentos, como exoesqueleto de camarón, exoesqueleto de cangrejo y desechos de peces, en energía eléctrica, degradándola con bacterias [11]. El ánodo es colocado debajo de la superficie del sedimento, mientras que el cátodo se encuentra suspendido sobre la superficie de este.

En el caso de las BCSC no se requiere de membrana de intercambio protónico debido a que el sedimento que separa los electrodos realiza esta función. Los protones migran hacia el cátodo; los electrones se transfieren de manera extracelular hacia el ánodo, generando un flujo a través de un circuito externo, ambos hacia el cátodo, siendo este flujo de electrones lo que genera la corriente eléctrica. En el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción del oxígeno generando agua como producto [20].

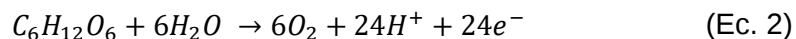
2.2. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA QUÍMICA Y ELÉCTRICA EN UNA BCSC

Cuando los organismos vivos metabolizan la materia orgánica para proveerse de energía, están aprovechando la energía de la oxidación de sustancias ricas energéticamente (ricas en electrones) como los carbohidratos (Ec. 1) [21].



En el catabolismo microbiano convencional, sustratos como los carbohidratos experimentan una oxidación inicial en ausencia de oxígeno, liberando electrones mediante reacciones enzimáticas. Estos electrones se conservan como intermediarios que, más adelante, son reducidos. En este estado reducido, se utilizan para desencadenar reacciones que suministran energía a

la célula, facilitando así su mantenimiento y crecimiento mediante procesos biosintéticos, Ec. (2) [21].



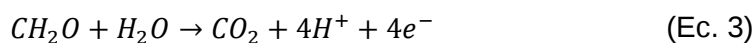
En situaciones donde falta oxígeno, los electrones necesitan ser extraídos de la cadena respiratoria mediante un mediador redox. Este mediador ingresa a la capa externa de la membrana celular, se reduce y luego regresa a su estado reducido. A continuación, este mediador transfiere los electrones “capturados” a un electrodo, que se convierte en un ánodo cargado negativamente. Los electrones fluyen a través de un circuito externo, generando corriente a medida que avanzan [6]. Para cerrar el circuito, se requiere un segundo electrodo, el cátodo, que cumple la función de aceptar finalmente los electrones. A diferencia del oxígeno, este cátodo actúa como un aceptor externo al sistema biológico [21].

2.2.1. Reacciones Redox Involucradas

Las reacciones redox (reducción-oxidación) son el fundamento del funcionamiento de las bioceldas de sedimento de combustible (BCSC). En estos sistemas, los microorganismos electrogénicos oxidan compuestos orgánicos presentes en el sedimento (anolito), liberando electrones y protones como resultado de su metabolismo. Estos electrones son transferidos al ánodo y viajan a través de un circuito externo hacia el cátodo, donde ocurre una reacción de reducción, cerrando así el circuito eléctrico [15], [22].

2.2.1.1. Reacción Anódica (Oxidación Bacteriana)

Las bacterias anaerobias oxidan compuestos orgánicos presentes en el sedimento o en residuos como sargazo o exoesqueleto de cangrejo. La reacción simplificada es:



Donde “CH₂O” representa un compuesto orgánico genérico. Los electrones generados fluyen al ánodo y al circuito externo [23].

2.2.1.2. Reacción Catódica (Reducción de Oxígeno)

Esta reacción ocurre en el cátodo en presencia de oxígeno disuelto y protones, permitiendo la conversión electroquímica completa del sustrato orgánico en dióxido de carbono y agua.



2.2.1.3. Reacción global

La energía liberada es capturada en forma de corriente eléctrica en lugar de calor, como ocurre en la combustión convencional [22].



2.3. PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS CLAVE

Para evaluar el rendimiento de las BCSC, es necesario analizar un conjunto de parámetros electroquímicos que permiten caracterizar el comportamiento eléctrico y energético del sistema, entre los que se incluyen el voltaje, corriente, densidad de corriente, densidad de potencia, punto de activación, resistencia óhmica, así como también la transferencia de masa.

2.3.1. Voltaje

El voltaje es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos en un circuito, y es lo que impulsa el flujo de electrones a través de un conductor. Se mide en voltios (V) y se considera una fuerza electromotriz que proporciona la energía

necesaria para que las cargas eléctricas se muevan. En el contexto de las bioceldas de sedimento, el voltaje es crucial para evaluar el rendimiento electroquímico, ya que refleja la capacidad del sistema para generar energía eléctrica a partir de las reacciones redox que ocurren en el ánodo y el cátodo [24], [25].

2.3.2. Corriente

La corriente es el flujo de carga eléctrica a través de un material conductor en respuesta a una diferencia de potencial (voltaje). Se mide en amperios (A) y representa la cantidad de carga eléctrica que atraviesa un punto del circuito por unidad de tiempo. En bioceldas de sedimento, la corriente está directamente relacionada con la eficiencia en la transferencia de electrones desde el ánodo hacia el cátodo a través de un circuito externo, lo cual refleja la actividad metabólica de los microorganismos electroactivos presentes en el anolito [24], [25].

2.3.3. Densidad de Corriente

La densidad de corriente es la cantidad de corriente eléctrica que fluye por unidad de área del electrodo, generalmente expresada en $\text{mA} \cdot \text{m}^{-2}$ o $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Este parámetro es crucial para evaluar la eficiencia y el rendimiento electroquímico de las bioceldas de sedimento, ya que refleja la capacidad del sistema para transferir electrones de la biopelícula microbiana hacia el ánodo. Una mayor densidad de corriente indica una mejor actividad electroquímica y una interacción eficiente entre microorganismos y el material del electrodo [24], [25].

2.3.4. Densidad de Potencia

Es la cantidad de potencia eléctrica generada por unidad de área del electrodo, y se calcula como el producto de la diferencia de potencial eléctrico por la corriente eléctrica del electrodo, tal como se muestra en la ecuación 6. Se expresa comúnmente en $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$. A través de este parámetro se puede comparar el rendimiento energético de diferentes configuraciones de BCSC, ya que normaliza la potencia generada con respecto al área del sistema.

$$J = \frac{P}{A} = \frac{V \cdot I}{A} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:

- J es la densidad de potencia ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
- P es la potencia eléctrica (W)
- V es la diferencia de potencial eléctrico (V)
- I es la corriente (A)
- A es el área geométrica del electrodo (m^2)

2.3.5. Punto de Activación

En sistemas electroquímicos como las BCSC se refiere al potencial mínimo necesario para superar la barrera energética y permitir que las reacciones de oxidación y reducción ocurran de manera eficiente en el electrodo. Este parámetro está relacionado con la energía de activación de las reacciones redox y es crucial para evaluar la eficiencia del sistema. En las bioceldas de sedimento, un punto de activación más bajo indica una menor barrera energética para que se lleve a cabo la transferencia de electrones, sugiriendo una mejor interacción entre el ánodo y los microorganismos electroactivos. [24], [25].

2.3.6. Resistencia Óhmica

La resistencia óhmica es la oposición lineal que presenta un sistema al paso de corriente eléctrica, Ec. (7). En las BCSC, esta resistencia proviene principalmente de la resistencia del electrolito (anolito y catolito), la resistencia interna del sedimento, la resistencia de contacto entre los electrodos y las conexiones (conductores, cables y terminales). Una resistencia óhmica elevada genera caídas en el potencial interno, reduciendo el voltaje del sistema y limitando la densidad de potencia. Por el contrario, una resistencia baja favorece una transferencia de electrones más eficiente, mejorando el rendimiento eléctrico de la celda [23], [25]. En las curvas de polarización, la resistencia óhmica se puede calcular a partir de la pendiente lineal en la región intermedia de la gráfica voltaje vs. corriente.

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

- R es la resistencia óhmica (Ω)
- V es la diferencia de potencial eléctrico (V)
- I es la corriente (A)

2.3.7. Transferencia de Masa

Es el proceso físico mediante el cual las especies químicas (como protones, oxígeno, sustratos orgánicos e iones) se desplazan desde el volumen del electrolito hacia la superficie del electrodo, donde tienen lugar las reacciones electroquímicas. En las bioceldas de sedimento, una transferencia de masa eficiente es crucial para mantener un suministro constante de sustrato, asegurando una generación de energía estable. La velocidad del proceso depende de factores como la concentración de reactivos, el coeficiente de

difusión de cada especie química, el gradiente de concentración y el diseño del sistema [24], [25] En la curva de polarización, la limitación por transferencia de masa se manifiesta en la región final donde el voltaje cae bruscamente. En las BCSC esto se debe a que la disponibilidad de materia orgánica cercana a las bacterias ya no es suficiente para mantener el ritmo de la reacción bioelectroquímica.

2.4. COMPONENTES DE LA BCSC

2.4.1. Ánodo

El material del ánodo ejerce una influencia determinante en el rendimiento electroquímico de las bioceldas de sedimento de combustible (BCSC). Un ánodo ideal debe poseer alta conductividad eléctrica, biocompatibilidad con los microorganismos electroactivos, estabilidad química, resistencia a la corrosión y una adecuada resistencia mecánica para soportar las condiciones del sistema [23], [26]. Además, es fundamental que el ánodo presente una elevada relación superficie-volumen, ya que esta característica incrementa la adhesión bacteriana y mejora la recolección y transferencia de electrones hacia el circuito externo [27].

Para mejorar la interacción bacteria-electrodo y optimizar la transferencia de electrones, se han desarrollado diversas estrategias de modificación superficial del ánodo. Estas incluyen tratamientos físicos (como la oxidación térmica) y químicos (funcionalización con grupos oxigenados o nitrogenados), recubrimientos con materiales altamente conductores o electroactivos (como óxidos metálicos o nanotubos de carbono), así como la utilización de electrodos compuestos que combinan metales y carbono [13], [16] Dichas modificaciones tienen como objetivo promover la formación de biopelículas electroactivas robustas y acelerar la transferencia extracelular de electrones,

lo que contribuye de manera significativa al aumento de la producción de energía en las bioceldas [16].

2.4.2. Cátodo

La modificación del cátodo juega un papel crucial en la mejora del rendimiento electroquímico de las BCSC, especialmente en la reacción de reducción de oxígeno, que es una de las etapas limitantes en estos sistemas electroquímicos. Los cátodos no catalizados presentan comúnmente una elevada sobretensión de activación, lo que limita significativamente la eficiencia global de la biocelda al dificultar la transferencia de electrones y la cinética de la reacción redox [28].

La eficiencia de la ORR depende directamente de la concentración de oxígeno (O_2) disponible en la interfase electrodo-solución, así como de la conductividad iónica del medio y de las propiedades difusivas en la capa de Nernst [29], [30]. De acuerdo con la ecuación de Nernst, un incremento en la concentración de O_2 genera un potencial catódico más positivo, ya favorece la reacción redox y la transferencia de carga [31].

Cuando el cátodo se encuentra totalmente sumergido, la disponibilidad de oxígeno disuelto ($\sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) es limitada, lo que ocasiona polarización catódica y pérdidas por difusión. En contraste, al exponer parcialmente el cátodo al aire, se incrementa el gradiente de concentración de oxígeno, lo que mejora su transporte hacia la superficie del electrodo, reduce la resistencia de difusión y eleva el potencial del cátodo. Este fenómeno produce una diferencia de potencial más amplia entre el ánodo y el cátodo, lo que se traduce en una mayor densidad de potencia y menor resistencia interna total [32], [33].

Estudios recientes han confirmado que los cátodos parcialmente expuestos al aire presentan un comportamiento electroquímico más favorable que los

completamente sumergidos. Se han demostrado que los cátodos con una fracción expuesta generaron potenciales entre +0.62 y +0.74 V vs Ag/AgCl, mientras que los totalmente sumergidos se mantuvieron entre +0.30 y +0.38 V, debido a la mayor difusión de oxígeno atmosférico y la reducción del sobrepotencial catódico [34].

2.4.3. Catolito

El catolito es el medio líquido que rodea el cátodo y en el cual se lleva a cabo la reacción de reducción de oxígeno necesaria para cerrar el circuito electroquímico en la BCSC. El pH es uno de los factores más importantes que que afecta directamente la disponibilidad de protones. Se ha encontrado que a un pH ácido eleva la producción de energía en las BCSC. Estudios han reportado que hay una mayor producción de energía a un pH ácido 2 en comparación con operaciones neutras y alcalinas [35].

2.4.4. Anolito

El anolito es el medio que rodea al ánodo, generalmente compuesto por sedimento natural rico en materia orgánica. Este entorno anóxico permite que bacterias electrogénicas, oxiden la materia orgánica, liberando electrones que fluyen hacia el ánodo y generan electricidad [36].

2.4.5. Temperatura

La temperatura constituye un parámetro crítico que afecta de manera significativa el rendimiento electroquímico de las BCSC, ya que incide tanto en la actividad microbiana como en las propiedades fisicoquímicas del sistema. En particular, la temperatura del catolito y del entorno regula el metabolismo de los microorganismos electroactivos, dado que las reacciones enzimáticas involucradas en la oxidación de sustratos y en la transferencia extracelular de electrones son altamente dependientes de la temperatura [7], [28].

2.4.6. Microorganismos

Los microorganismos son elementos fundamentales en el funcionamiento de las BCSC, ya que su actividad metabólica permite la conversión de energía química de un sustrato orgánico en energía eléctrica. Los electrones producidos en la cámara anódica deben ser transferidos al ánodo por medio de transportadores de electrones o mediadores electrónicos, lo que puede ser afectado por la presencia de microorganismos con membranas no conductoras que ralentizan la transferencia directa de electrones al ánodo [37].

El potencial de la celda depende de la vía metabólica de los microorganismos y de la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo. La diversidad de microorganismos en las bioceldas también puede influir en la generación de energía y en la capacidad de remoción de contaminantes y en la estabilidad del sistema. Además, los microorganismos en las bioceldas pueden ser utilizados para producir subproductos de valor o eliminar compuestos no deseados [3].

2.4.7. Desechos Orgánicos

La quitina es un polisacárido, presente en el exoesqueleto de crustáceos, insectos y en las paredes celulares de hongos. Aunque cumple funciones biológicas esenciales, su acumulación como residuo representa un problema ambiental debido a su baja biodegradabilidad en comparación con otros polisacáridos como la celulosa [19]. En México, la industria pesquera genera más de 300,000 toneladas anuales de residuos de crustáceos (camarón, langosta y cangrejo), ricos en quitina, cuya disposición inadecuada contribuye a la contaminación y proliferación de patógenos en zonas costeras [12], [38].

Por otro lado, la proliferación del sargazo pelágico (*Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*) se ha convertido en un problema ecológico y socioeconómico grave en el Caribe mexicano. En 2019, se reportó el arribo de

más de un millón de toneladas a las playas de Quintana Roo, afectando la biodiversidad, alterando la salinidad y generando condiciones anóxicas que deterioran la calidad del agua y la economía turística [9], [18], [39].

Dado el alto volumen de estos residuos, su valorización mediante tecnologías bioelectroquímicas, como las bioceldas de sedimento de combustible (BCSC), representa una alternativa sostenible para aprovechar su contenido orgánico y reducir su impacto ambiental, contribuyendo al desarrollo de fuentes limpias de energía.

2.5. REGIONES DE UNA CURVA DE POLARIZACIÓN

Las curvas de polarización son herramientas fundamentales en el análisis electroquímico, ya que permite estudiar el comportamiento de materiales y procesos en función de su respuesta ante la aplicación de un potencial eléctrico. Estas curvas representan la relación entre la densidad de corriente y el potencial eléctrico de un sistema electroquímico bajo condiciones controladas. La interpretación de una curva de polarización proporciona información sobre los mecanismos de transferencia de carga, reacciones redox en diferentes condiciones y las limitaciones cinéticas, resistivas o difusionales que afectan el sistema. La interpretación de estas curvas se divide en varias regiones características, que reflejan fenómenos específicos como la región de activación, la región de control de concentración o difusión, y la región de corriente de intercambio como de muestra en la Figura 1. Cada una de estas áreas proporciona información crucial sobre la velocidad de reacción, la eficiencia de conversión energética en sistemas electroquímicos y para determinar las estrategias de optimización en dispositivos como las celdas de combustible, baterías, y celdas bioelectroquímicas.

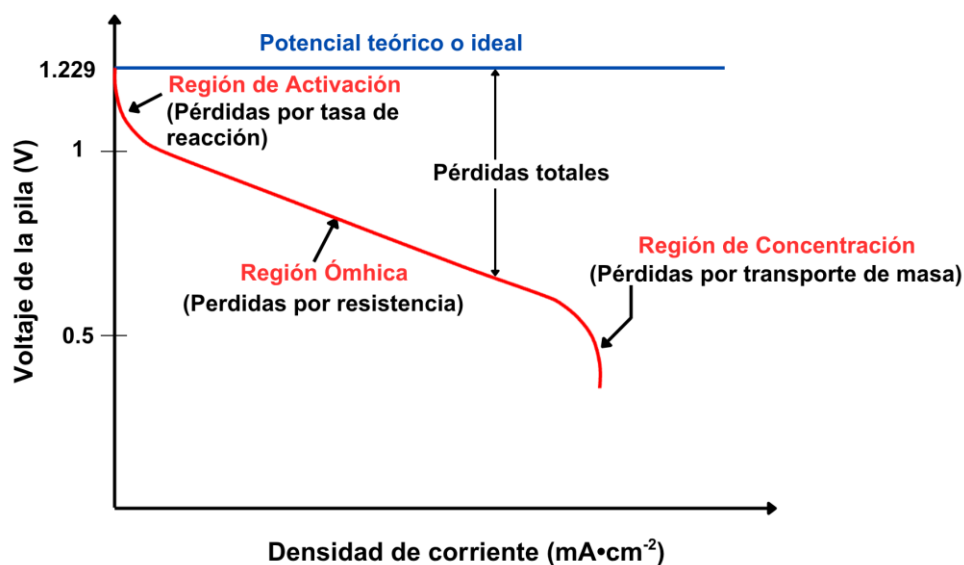


Figura 1. Curva de polarización típica de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés).

2.5.1. Región de Activación

En esta fase, la densidad de corriente es limitada por la cinética de las reacciones redox (oxidación o reducción) que tienen lugar en la superficie de los electrodos. Este comportamiento está gobernado por la energía de activación necesaria para que las especies electroactivas superen la barrera energética y participen en la transferencia electrónica.

A medida que se incrementa el potencial aplicado, la corriente aumenta de forma exponencial, lo cual refleja que el sistema está operando en un régimen controlado por la activación electroquímica. La magnitud de esta barrera cinética depende de múltiples factores, incluyendo la composición química y la morfología superficial del material del electrodo, la afinidad entre el electrodo y las especies reactivas, y la presencia de catalizadores capaces de disminuir la energía de activación, promoviendo así la eficiencia de las reacciones redox [15].

En el caso de celdas de combustible microbianas y otras aplicaciones bioelectroquímicas, se ha demostrado que modificaciones estructurales del electrodo, como el aumento de su área superficial o la incorporación de nanomateriales, pueden reducir significativamente la resistencia asociada a esta región activada [15], [23], [40].

2.5.2. Región de Resistencia Óhmica

La resistencia óhmica representa la oposición al flujo de corriente dentro del sistema y es atribuible principalmente a la baja conductividad del electrolito, las conexiones eléctricas y la distancia entre electrodos. Esta resistencia genera una pérdida lineal de voltaje proporcional a la corriente aplicada y se manifiesta principalmente en la región ohmica de la curva de polarización [41].

En celdas bioelectroquímicas tiene una elevada resistencia óhmica puede reducir significativamente la eficiencia del sistema. Por ello, estrategias como el uso de electrolitos con alta conductividad iónica, el acercamiento entre ánodo y cátodo y la mejora de las conexiones eléctricas han sido implementadas para reducir estas pérdidas [42]. La correcta identificación de esta región permite diferenciarla de las pérdidas por activación y difusión, facilitando un análisis electroquímico integral del sistema.

Aquí, el flujo de corriente está limitado por la conductividad iónica del electrolito y la resistencia de los contactos eléctricos en el sistema. Este efecto se refleja en la curva como un aumento casi lineal de la corriente con el potencial. La pendiente en esta región proporciona información sobre la resistencia total del sistema, que incluye tanto la resistencia del electrolito como las conexiones eléctricas. Reducir la resistencia óhmica es clave para mejorar la eficiencia en sistemas como baterías y celdas de combustible [41].

2.5.3. Región de Transferencia de Masa

La región de transferencia de masa corresponde a la etapa final de la curva de polarización, en la que la corriente generada por el sistema alcanza un valor máximo denominado corriente límite. En esta fase, cualquier incremento adicional del potencial aplicado no resulta en un aumento significativo de la corriente, debido a que la velocidad de transporte de los reactivos hacia la superficie del electrodo se convierte en el factor limitante del proceso [23]. Este fenómeno se debe a la difusión insuficiente de las especies reactivas desde el seno de la solución hacia la interfase electrodo-electrolito, lo que genera una zona de agotamiento donde las especies se consumen más rápido de lo que pueden reponerse.

Este tipo de limitación es común en sistemas con difusión lenta o geometrías inadecuadas, y se considera un factor crítico en el diseño de sistemas electroquímicos eficientes, como celdas de combustible microbianas. La optimización de la transferencia de masa mediante el diseño de electrodos porosos ha demostrado que mejorar la eficiencia energética en estos sistemas [43].

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El presente capítulo describe de manera detallada la metodología empleada para evaluar el rendimiento electroquímico de bioceldas de sedimento de combustible (BCSC), enfocándose en la modificación del ánodo y el uso de materia orgánica como fuente energética microbiana. El diseño experimental fue estructurado con base en los objetivos planteados, considerando variables como el tipo de material anódico, el tamaño de partícula del sustrato orgánico, y la composición del catolito, a fin de analizar su efecto en la generación de potencia y la resistencia interna de las celdas.

Se seleccionó sedimento natural de la Laguna de Coatetelco, Morelos, como medio anódico (anolito), debido a su disponibilidad local y contenido microbiológico inherente. Como ánodos se utilizaron mallas de acero inoxidable, las cuales fueron sometidas a un tratamiento térmico por flama para inducir la formación superficial de óxidos de hierro (Fe_2O_3), con el propósito de mejorar la interacción electroquímica con bacterias electroactivas. En el compartimento catódico, se empleó tela de fibra de carbono sumergida en agua ajustada a pH ácido con ácido sulfúrico, con y sin la adición de sulfato de sodio, con el fin de evaluar el efecto de la conductividad iónica sobre el desempeño de las BCSC.

Para la evaluación del efecto del sustrato, se seleccionaron dos residuos orgánicos de origen marino: exoesqueleto de cangrejo y sargazo pelágico. Ambos materiales fueron previamente lavados, secados, molidos y tamizados a dos tamaños de partícula distintos (60 malla y 12 malla), y posteriormente incorporados al sedimento en cantidades estandarizadas según el área del ánodo.

Las bioceldas se ensamblaron en recipientes de PET transparentes que permitieron visualizar el montaje y facilitar las mediciones. Se dejó estabilizar el sistema durante un periodo de 12 a 24 días según el tipo de ánodo, hasta alcanzar un potencial de circuito abierto estable. Posteriormente, se realizaron mediciones electroquímicas, incluyendo curvas de descarga y curvas de polarización, variando resistencias externas en un amplio rango, con el objetivo de calcular la densidad de corriente, la densidad de potencia y la resistencia óhmica de cada configuración experimental.

Esta metodología permitió comparar el impacto de las distintas variables estudiadas sobre el comportamiento electroquímico de las BCSC, contribuyendo al diseño de sistemas bioelectroquímicos más eficientes y sostenibles. Por otra parte, para el montaje de la biocelda se determinó un diseño de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2.

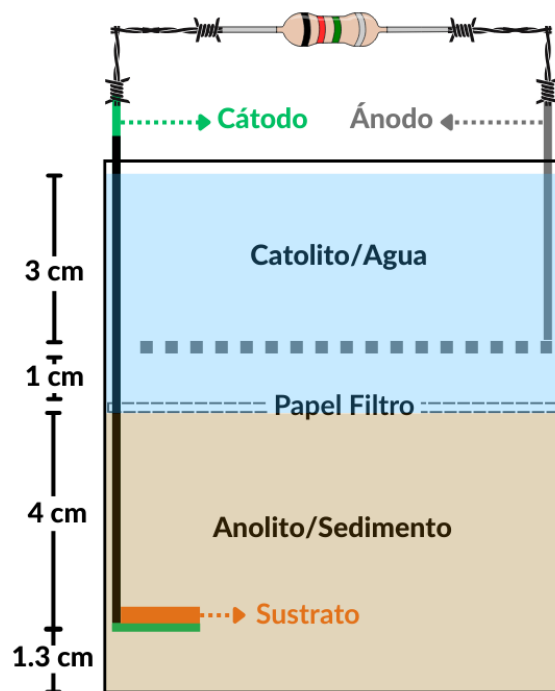


Figura 2. Representación esquemática del montaje de una BCSC y los elementos que la conforman.

3.1.1. Materiales y Diseño del Sistema Experimental

3.1.1.1. Dimensiones y Características del Recipiente Utilizado

Para el montaje de la BCSC se eligió un recipiente de PET de 71 mm de diámetro y 159 mm de altura (Fig. 3). El emplear un envase transparente facilita el montaje de las bioceldas.

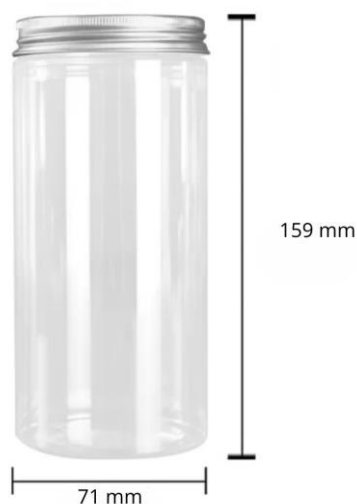


Figura 3. Envase de tereftalato de polietileno (PET) de 500 ml.

3.1.1.2. Cátodos

Se seleccionó fibra de carbón unidireccional (FibreGlast 2583-C) con un diámetro de 7 cm como material base para la elaboración de los cátodos. Con la finalidad de mejorar el contacto eléctrico, la fibra fue entretejida con alambre de acero inoxidable. Posteriormente, el conjunto se montó sobre un palillo de madera asegurándolo a 6.3 cm desde la base (Fig. 4).

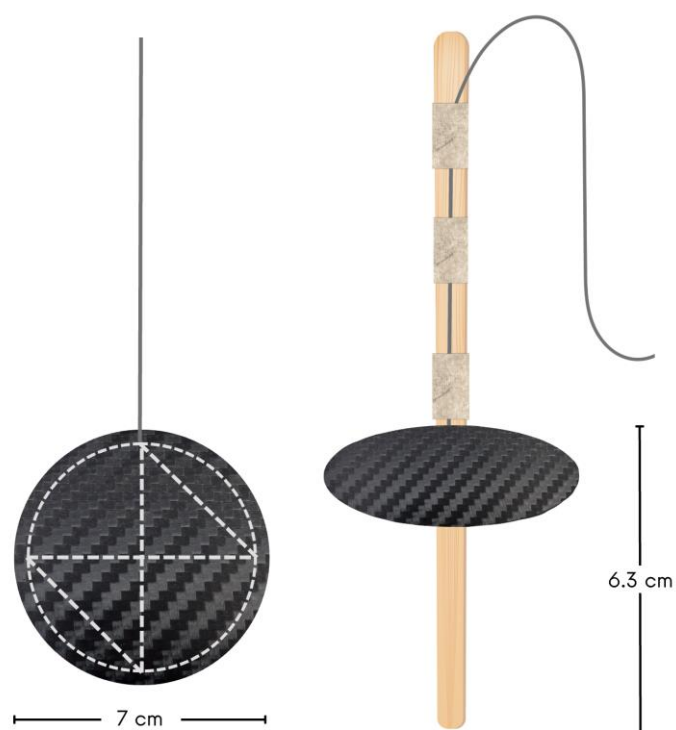


Figura 4. Representación esquemática de los cátodos de fibra de carbón unidireccional y del montaje en un palillo de madera a 6.3 cm de la base.

3.1.1.3. Ánodos

Se eligieron ánodos de acero inoxidable debido a su alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y carácter inerte. Los electrodos se cortaron con las dimensiones indicadas en la Figura 5, dando como resultado un área geométrica expuesta de 2 cm². Posteriormente, fueron sumergidos en acetona durante 24 horas y sometidos a un tratamiento por ultrasonido a 50 W durante 15 minutos. Después de este proceso, se retiraron y se dejaron secar a temperatura ambiente (Fig. 5).



Figura 5. Dimensiones y proceso de limpieza del ánodo.

Una vez secos, se aplicó un tratamiento térmico por flama, manteniendo una distancia de 5 cm entre la cabeza del soplete y la superficie del electrodo, con una exposición de 6 minutos, esto para generar óxidos de hierro (Fig. 6), para generar nanotubos de carbono se mantuvo una distancia de 3 mm de la cabeza del soplete a la superficie de electrodo durante 6 minutos.

A continuación, se aplicaron tres capas de barniz de uñas sobre la pestaña del electrodo (excepto en el extremo superior), y se colocó un alambre del mismo material (acero inoxidable) en dicha sección. Esta unión fue recubierta con tubo termo-contráctil para su aislamiento. Finalmente, el ánodo fue montado sobre un palito de madera, asegurando que quedara posicionado a 1.3 cm de la base del soporte ver Figura 7.

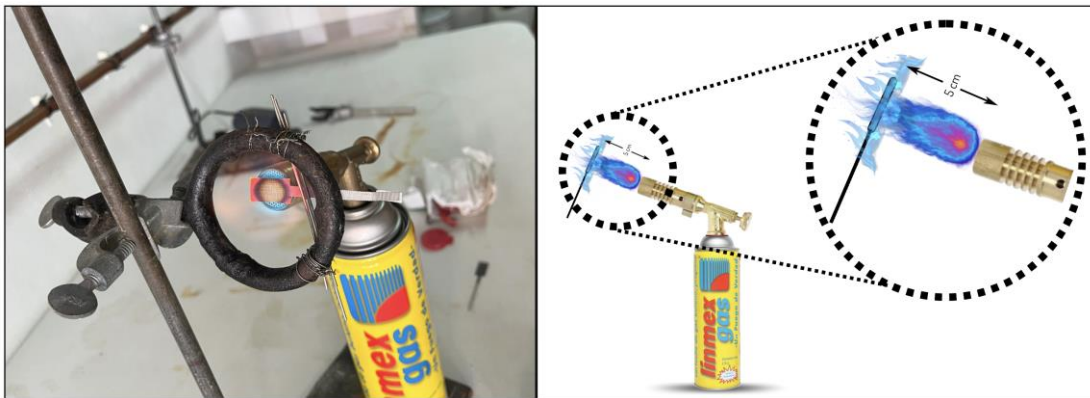


Figura 6. Imagen y representación esquemática del tratamiento térmico por flama de un electrodo de acero inoxidable.

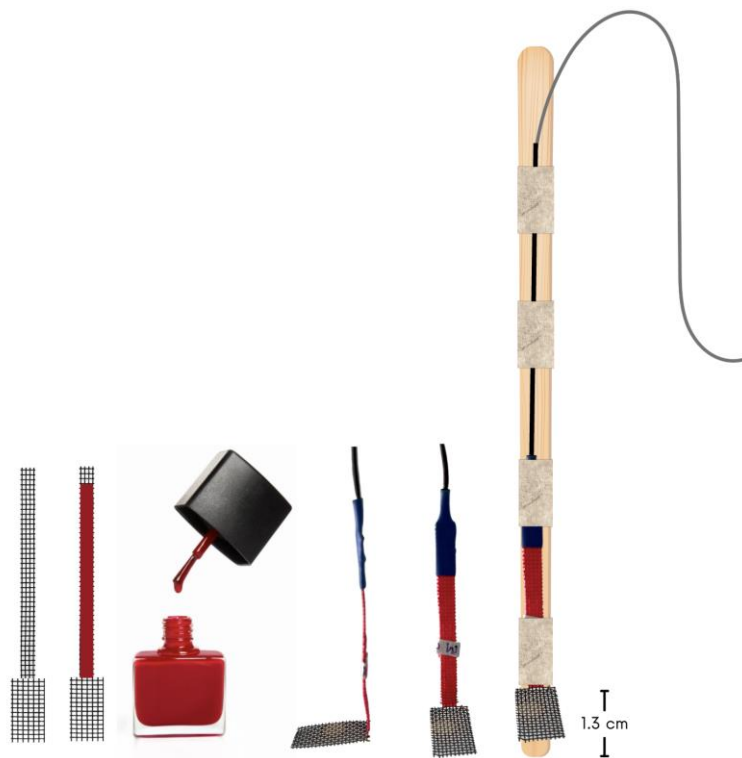


Figura 7. Proceso de preparación y montaje de un ánodo de acero inoxidable.

3.1.2. Procedencia del Sedimento

Se utilizó sedimento de la laguna de Coatetelco, Morelos, México ($18^{\circ}44'45.1''\text{N}$ $99^{\circ}19'59.0''\text{W}$). La recolección se realizó a una profundidad de 1.20 m, depositando el material en una cubeta de 20 L. Una vez trasladado al laboratorio, el sedimento se mantuvo a temperatura ambiente (25°C) hasta su uso. El montaje de las BCSC se llevó a cabo 24 h después de la recolección (Fig. 8).



Figura 8. Ubicación de la zona donde se obtuvo el sedimento en la laguna de Coatetelco.

3.1.3. Preparación de la Materia Orgánica

Se propuso el uso de exoesqueleto de cangrejo y sargazo como fuente de alimento para las bacterias presentes en las BCSC. Estos materiales se seleccionaron por su contenido de compuestos orgánicos biodegradables y su disponibilidad como residuos, lo que favorece su aprovechamiento en procesos de generación bioeléctrica.

3.1.3.1. Molienda y Tamizado

Se realizó la molienda y clasificación de la materia orgánica con el objetivo de obtener un tamaño de partícula adecuado para su posterior uso. La trituración se efectuó utilizando una trituradora de café marca AMYTY, con una potencia de 150 W y dimensiones de 85 mm × 155 mm (Fig. 9). Posteriormente, las partículas obtenidas se clasificaron mediante tamices de malla 12 y malla 60, con aperturas de 1.6 mm y 0.3 mm, respectivamente (Fig. 10).



Figura 9. Molino de café para procesamiento de materia orgánica.



Figura 10. Tamices estándar de laboratorio 304 SUS.

3.1.3.2. Adición de Materia Orgánica en el Anolito

Se pesaron 0.34 g de exoesqueleto de cangrejo y 0.34 g de sargazo (para ambos tamaños de partícula: 12 y 60 malla) ya que en trabajo previos se observó que era la cantidad de materia orgánica adecuada, para ese tamaño de electrodos, se utilizó una balanza analítica para pesar las cantidades correspondientes a un electrodo con un área de 2.2 cm². Para los electrodos de mayor tamaño, con un área de 25 cm², se emplearon 4.25 g de exoesqueleto de cangrejo y 4.25 g de sargazo, manteniendo los mismos tamaños de partícula (12 y 60 malla).

3.1.4. Montaje de las BCSC

El montaje de las BCSC (Fig. 11) se llevó a cabo siguiendo una metodología estandarizada. Inicialmente, se agregaron 70 g de sedimento en el fondo del recipiente, lo que correspondió a una altura aproximada de 1.3 cm. A continuación, se colocó el ánodo con las características descritas anteriormente en el capítulo 2.1.3. En el caso de la celda de referencia (control). Cuando se utilizó materia orgánica, esta se colocó sobre el ánodo junto con una pequeña porción de sedimento, mezclándose ligeramente antes.

Posteriormente, se añadieron 219 g de sedimento sobre el ánodo, alcanzando una altura de 4 cm dentro del recipiente. Para evitar la mezcla del sedimento con el catolito, se colocó un papel filtro de 7 cm de diámetro sobre la superficie del sedimento. El cátodo se posicionó a 1 cm por encima del sedimento y a 5 cm del ánodo.

Luego, se vertieron 192 ml de agua de la llave, lo que equivale a 5 cm de altura en el recipiente. En el interior del catolito se introdujo una manguera con difusor de piedra, conectada a una bomba de pecera, con el fin de mantener un burbujeo constante y asegurar la saturación de oxígeno. Finalmente, se cerró el circuito mediante una resistencia de 47 k Ω .

Este procedimiento se repitió para cada una de las BCSC, conforme a lo establecido en la propuesta experimental (Tabla 1).

Tabla 1 Configuración de las bioceldas de sedimento

Leyenda	Ánodo	Cátodo	Anolito	Catolito	Tratamiento termico	Materia Organica		Tamaño de particula	
						Cangrejo	Sargazo	60	12
Control	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—
Cangrejo 60 mesh	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	—
Cangrejo 12 mesh	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✓
Sargazo 60 mesh	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	—
Sargazo 12 mesh	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	—	✓
Nanotubos de carbono	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—
Cangrejo 60 mesh	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	—
Sargazo 60 mesh	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	—



Figura 11. Ejemplo del montaje de una BCSC montada en el laboratorio.

En la cámara catódica se adicionaron 19 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a una concentración de 1 M con el propósito de acidificar el medio y garantizar una concentración adecuada de protones (H^+). Esta acidificación favorece la reacción de reducción del oxígeno molecular (O_2) en el cátodo, facilitando la formación de agua y mejorando la eficiencia de transferencia electrónica en el sistema. El uso de un catolito ácido también contribuye a reducir la resistencia de activación y a incrementar la conductividad iónica del medio.

Posteriormente, se adicionó sulfato de sodio (Na_2SO_4) a una concentración de 0.5 M con el fin de incrementar la conductividad iónica del catolito sin alterar significativamente el pH, aprovechando su carácter de electrolito fuerte para mejorar el transporte de iones y disminuir la resistencia interna sistema.

3.1.5. Caracterización Electroquímica

Una vez concluido el periodo de estabilización, se realizaron las mediciones de potencial variando las resistencias desde 39 k Ω hasta 0.39 k Ω , con el objetivo de calcular la corriente de acuerdo con la Ley de Ohm (Ec. 8) y, posteriormente, elaborar las curvas de descarga.

$$V = R \times I \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde: V = voltaje en V
 I = corriente en A
 R = resistencia en Ω

Las mediciones se llevaron a cabo de la siguiente manera: primero se registró el valor de potencial utilizando la resistencia más alta (39 k Ω). A continuación, se cambió a la siguiente resistencia más baja (33 k Ω) y se tomó una nueva lectura. Posteriormente, se regresó a la resistencia más alta (39 k Ω) antes de cambiar nuevamente a una resistencia más baja (22 k Ω). Este procedimiento se repitió de forma sucesiva hasta llegar a la resistencia de 0.39 k Ω . Es importante destacar que entre cada medición y cambio de resistencia se mantuvo un tiempo de estabilización de 15 minutos.

3.1.6. Curvas de Densidad de Potencia

La elaboración de los gráficos de densidad de potencia requirió, con anterioridad, realizar los cálculos correspondientes. Primero se estimó la potencia (Ec. 9) y posteriormente la densidad de potencia (Ec. 10).

$$P = I \times V \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde: P = potencia en W
 I = corriente en A
 V = voltaje en V

$$J = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde: $J = \text{densidad de potencia en } W \cdot m^{-2}$
 $I = \text{corriente en A}$
 $A = \text{área geométrica del ánodo en } m^2$

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESEMPEÑO ELECTROQUÍMICO DE LAS BCSC

Los resultados experimentales obtenidos demuestran la influencia del tipo de ánodo, el tamaño de partícula de la materia orgánica y la adición de un electrolito fuerte en el comportamiento electroquímico de las bioceldas de sedimento de combustible (BCSC). Se evaluaron dos configuraciones de ánodos: óxidos de hierro (Fe_2O_3) y nanotubos de carbono (NTC), empleando exoesqueleto de cangrejo y sargazo pelágico como fuentes de materia orgánica en diferentes tamaños de partícula (60 mesh y 12 mesh). El catolito se ajustó inicialmente a un pH 2 con H_2SO_4 0.01 M y, posteriormente, se adicionó Na_2SO_4 0.5 M para mejorar la conductividad iónica.

4.2. CURVAS DE ESTABILIZACIÓN

Las bioceldas con ánodos de Fe_2O_3 alcanzaron el estado de equilibrio electroquímico en un periodo de 12 días, como se puede observar en la Figura 12 logrando un potencial de circuito abierto entre 0.5 y 0.7 V. En contraste, las celdas con ánodos de NTC requirieron 22 días para estabilizarse, como se observa en la Figura 13, con un potencial de equilibrio entre 0.5 y 0.6 V. Este comportamiento sugiere una mayor eficiencia de los ánodos de Fe_2O_3 en la transferencia de electrones y la interacción con las bacterias electroactivas presentes en el sedimento.

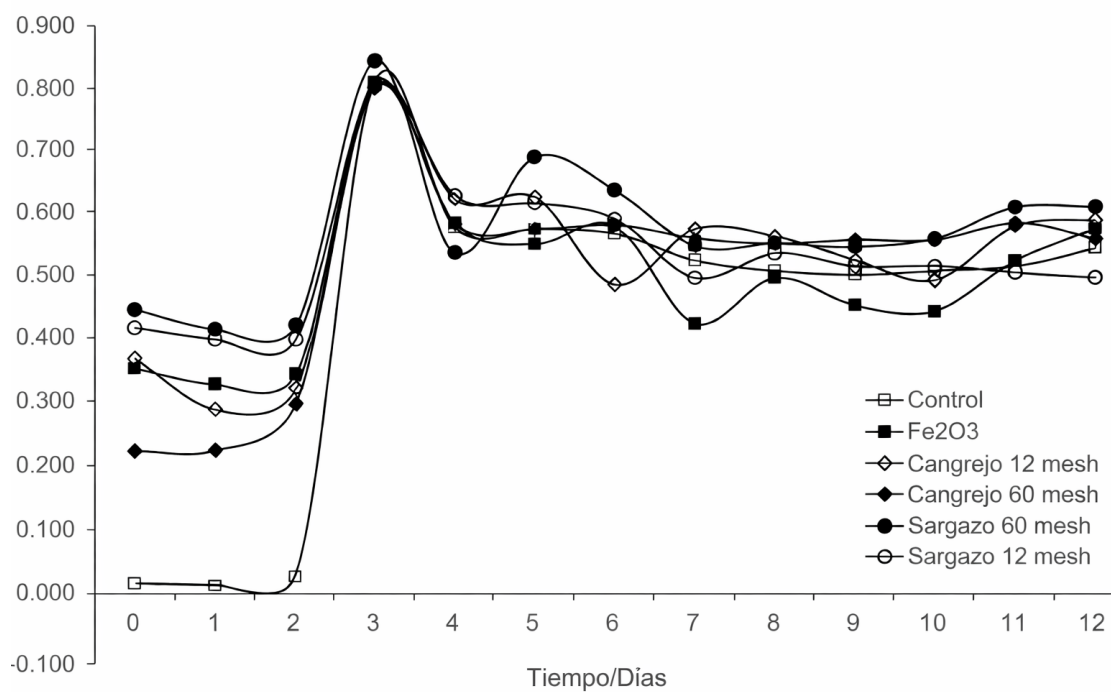


Figura 12. Curvas de estabilización de BCSC con electrodo de Fe₂O₃.

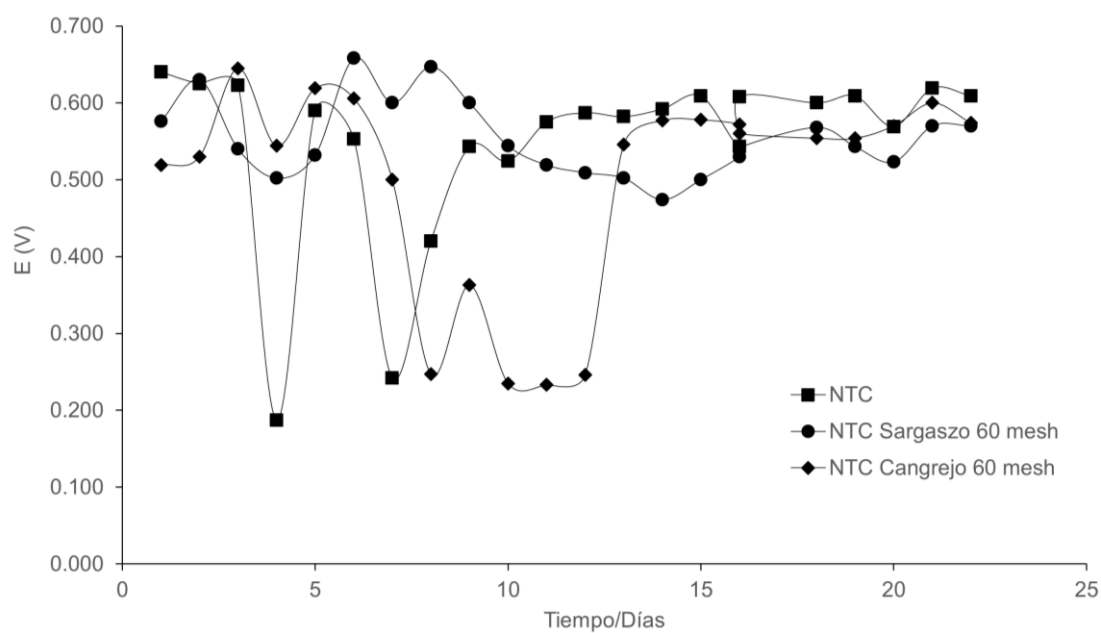


Figura 13. Curvas de estabilización de BCSC con electrodo de nanotubos de carbono.

4.3. DENSIDAD DE POTENCIA

La densidad de potencia se estimó a partir de las curvas de descarga, observándose diferencias significativas entre las configuraciones evaluadas. En las BCSC con ánodos de Fe_2O_3 y H_2SO_4 0.01 M como catolito, la mayor densidad de potencia registrada fue de $921.4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ con una densidad de corriente de $2602.9 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$, como se indica en la Figura 14. Posteriormente, al adicionar Na_2SO_4 0.5 M, estos valores aumentaron a $1026 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ y $3026 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente, evidenciando la mejora en la conductividad iónica y la eficiencia del sistema, tal como se observa en la Figura 15.

Por otro lado, las BCSC con ánodos de NTC y H_2SO_4 0.01 M presentaron una densidad de potencia máxima de $401.7 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, $2269 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$, como se observa en la Figura 16, incrementándose a $648.6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, $2183 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$.

como se muestra en la Figura 17, tras la adición de Na_2SO_4 . Esta comparación refuerza la superioridad de los ánodos de Fe_2O_3 en términos de generación de energía, especialmente en presencia de un electrolito fuerte como el Na_2SO_4 .

Estos resultados muestran un incremento significativo en la densidad de potencia en comparación con estudios previos. Por ejemplo, en una investigación se reportó una densidad de potencia máxima de $850 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ utilizando ánodos de acero inoxidable oxidado a flama [44], mientras que en otra se alcanzaron valores de $920 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ con ánodos modificados con Fe_2O_3 en sistemas de aguas residuales [13]. La presente investigación supera dichos valores, lo que resalta la efectividad de la combinación de óxidos de hierro, sargazo 60 malla11 y Na_2SO_4 como catolito.

Por su parte, las BCSC con ánodos de NTC presentaron una densidad de potencia máxima de $648.6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ tras la adición de Na_2SO_4 , lo que confirma la superioridad de los ánodos de Fe_2O_3 en la generación de energía.

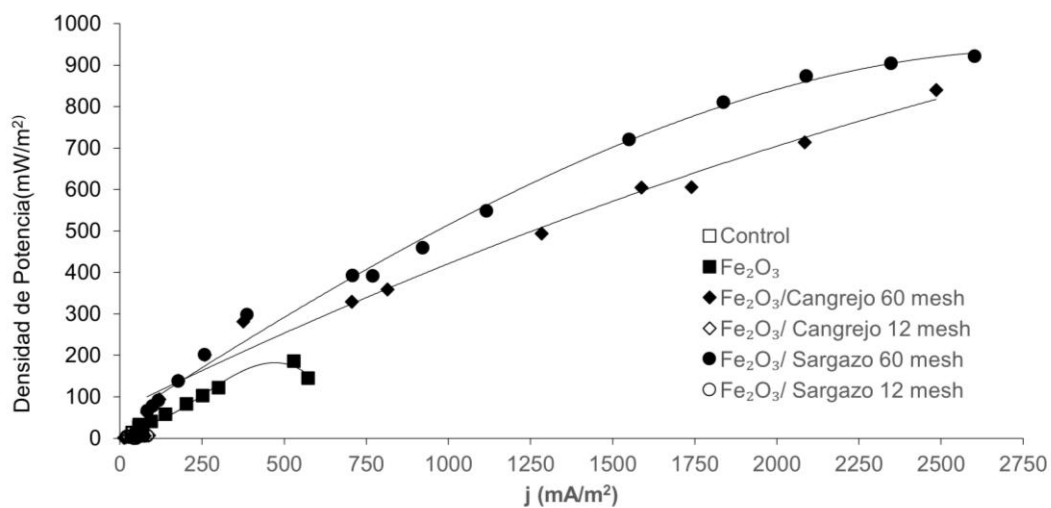


Figura 14. Curvas de densidad de potencia de BCSC con electrodo de Fe_2O_3 y H_2SO_4 , pH 2.

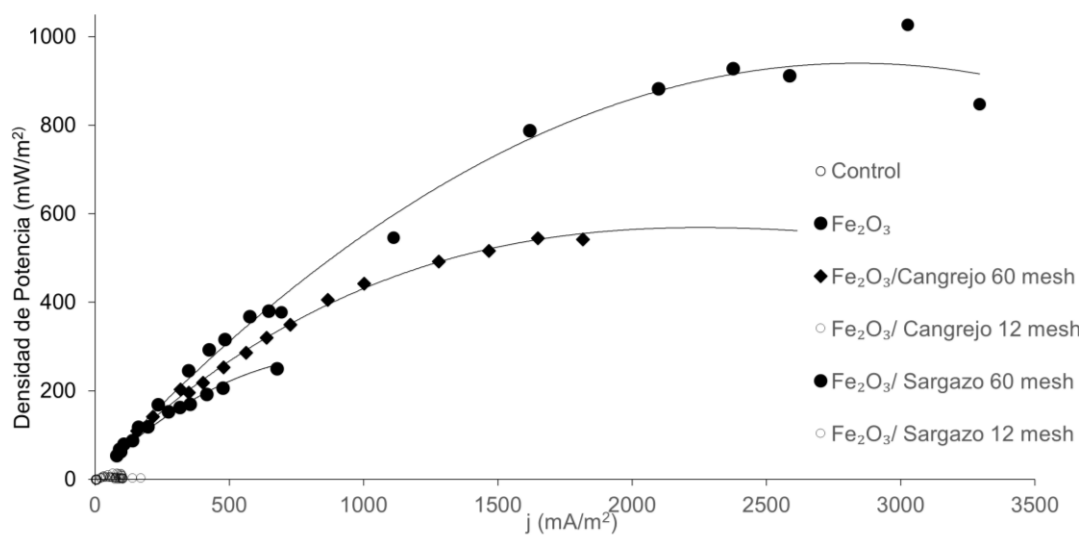


Figura 15. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.

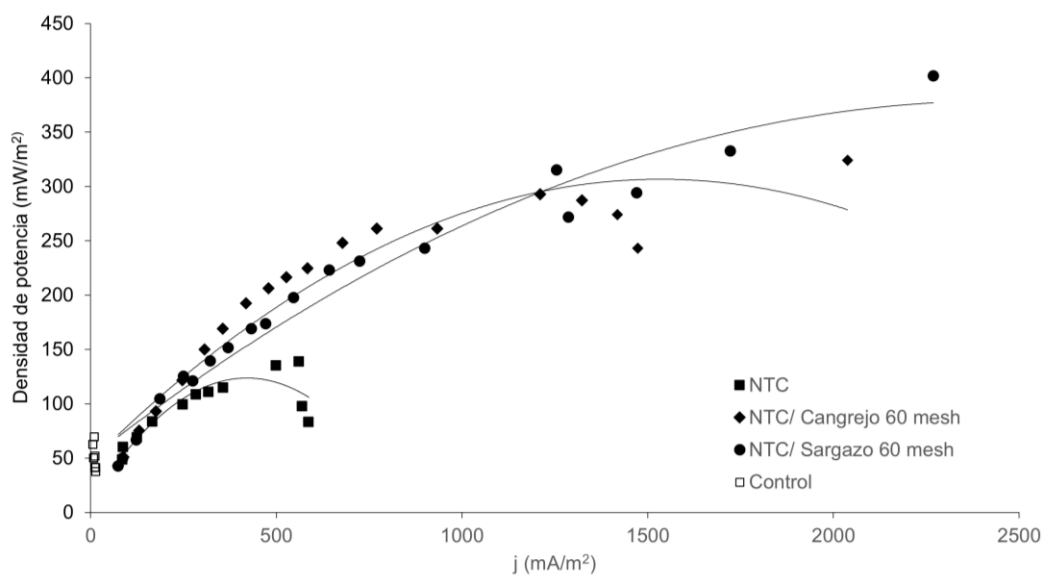


Figura 16. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H₂SO₄, pH 2.

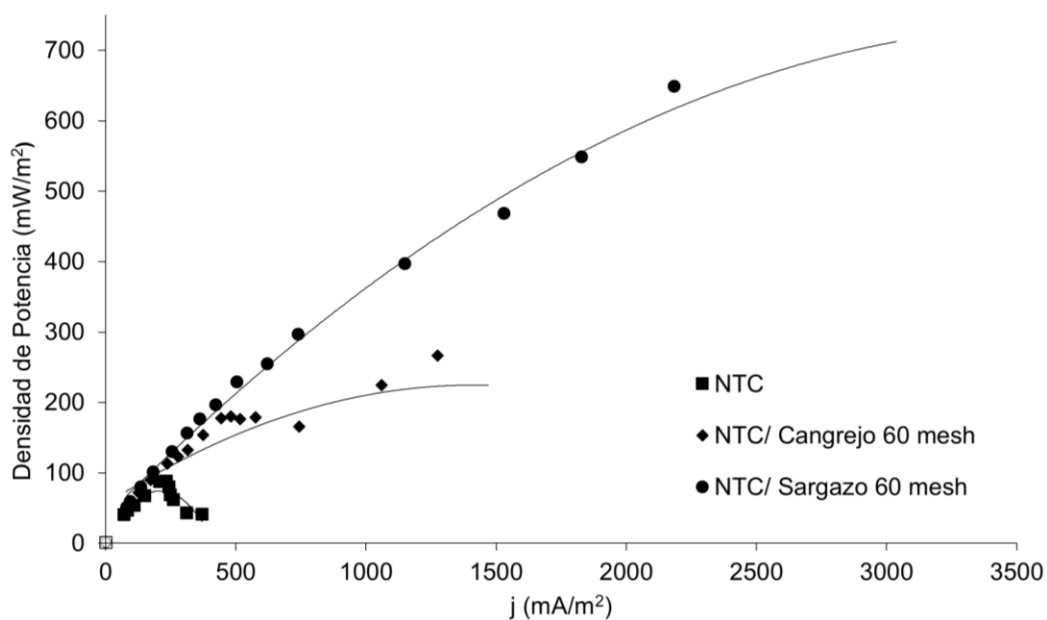


Figura 17. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H₂SO₄ y Na₂SO₄, pH 2.

4.4. ESTUDIO DE POLARIZACIÓN

El estudio de polarización permitió analizar las diferentes regiones de comportamiento electroquímico de las BCSC, clasificadas en tres fases: región de activación, región de resistencia óhmica y región de transferencia de masa.

En la región de activación, se observó una cinética más rápida en las BCSC con ánodos de Fe_2O_3 y Na_2SO_4 0.5 M, alcanzando el potencial de equilibrio con una menor barrera de energía activación en comparación con aquellas que no contenían Na_2SO_4 , tal como se observa en las Figuras 18 y 19.

Por otro lado, las BCSC con ánodos de NTC mostraron una activación más lenta, incluso con Na_2SO_4 (Fig. 20) y sin Na_2SO_4 (Fig. 21), en comparación con las de Fe_2O_3 , lo que evidencia una mayor barrera energética para la transferencia de electrones.

En la región de transferencia de masa, la cinética de llegada de los reactivos al electrodo fue más eficiente en las configuraciones con Na_2SO_4 , favoreciendo una mayor densidad de corriente. Este efecto fue particularmente notable en las BCSC con ánodos de Fe_2O_3 y sargazo 60 malla, alcanzando una transferencia de masa eficiente y maximizando la generación de energía.

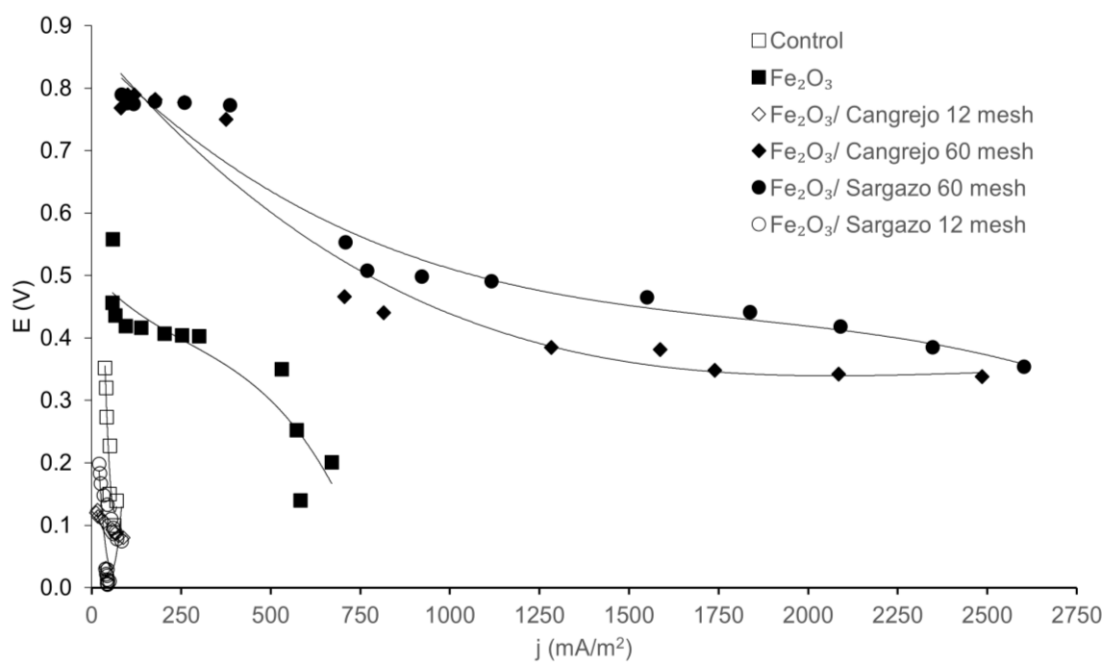


Figura 18. Curvas de polarización de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 , pH 2.

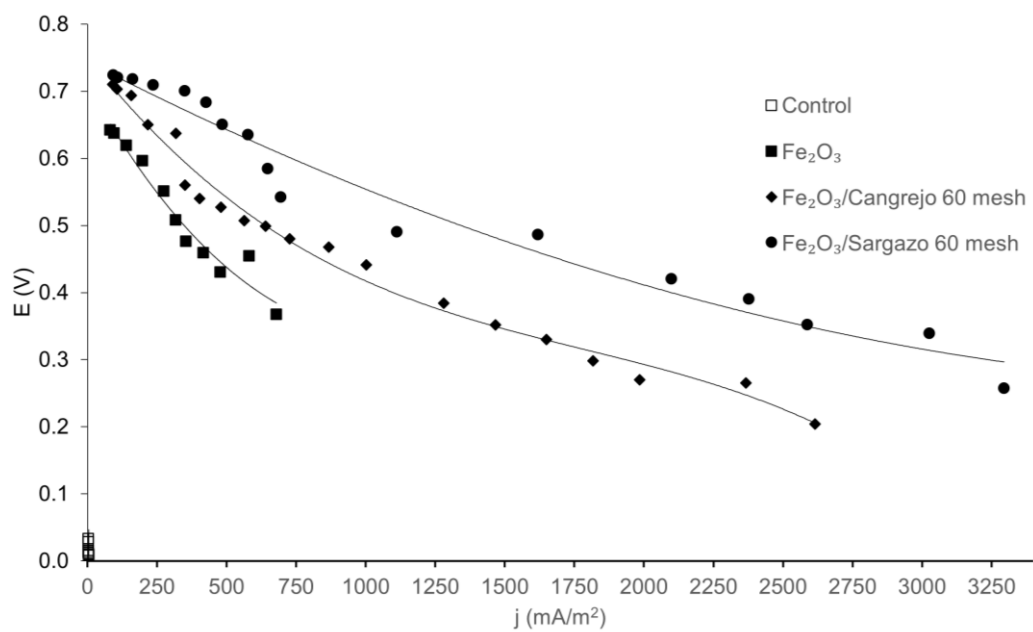


Figura 19. Curva de polarización de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.

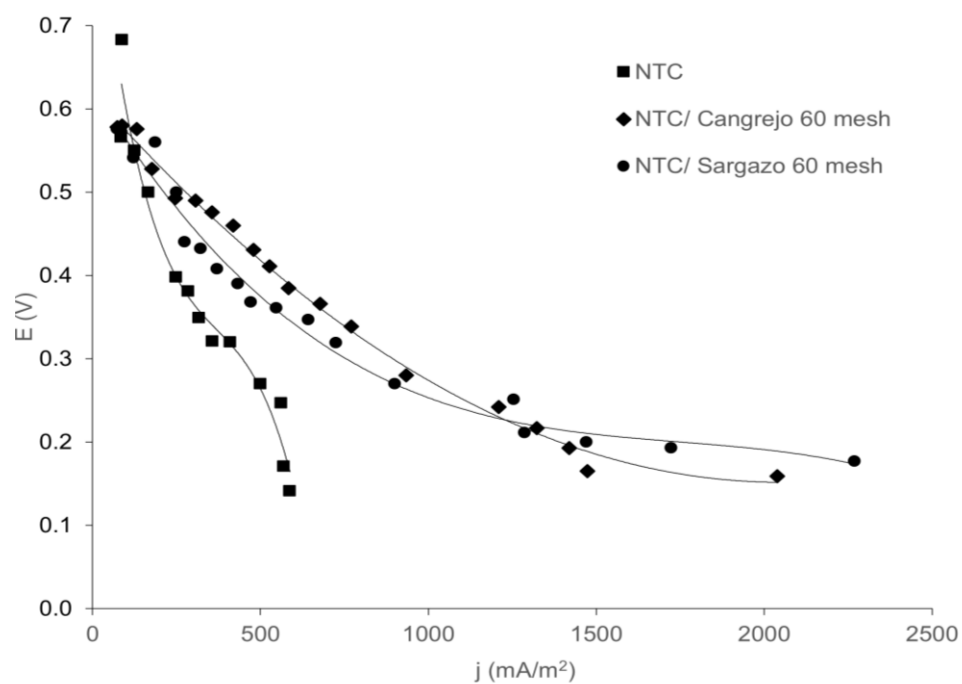


Figura 20. Curva de polarización de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 , pH 2.

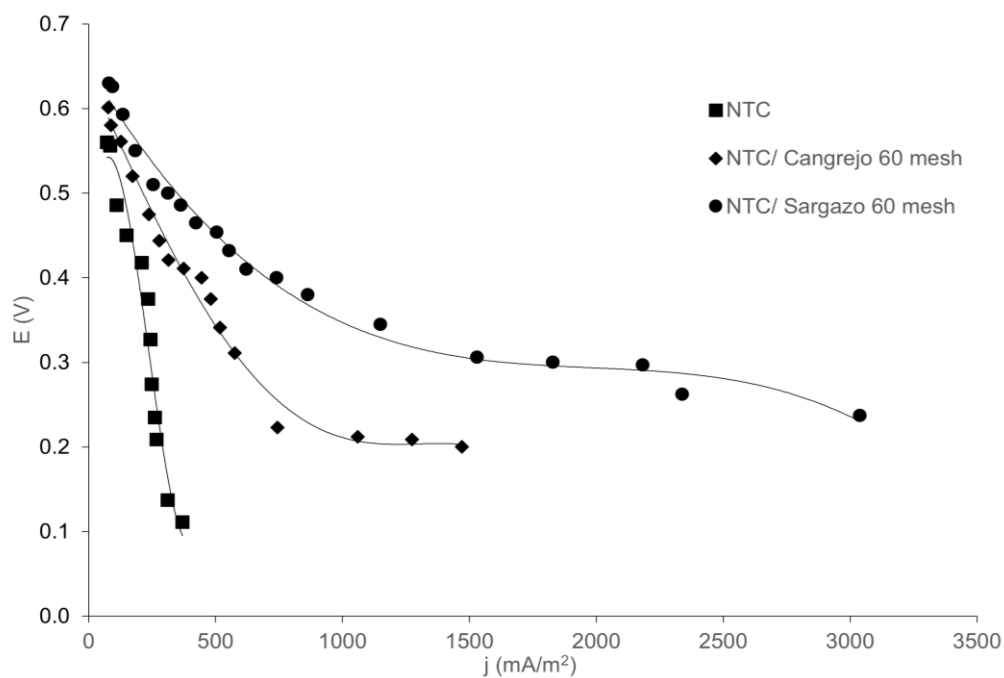


Figura 21. Curva de densidad de potencia de bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.

4.5. RESISTENCIA ÓHMICA

El análisis de la resistencia óhmica mostró una reducción significativa con la incorporación de Na_2SO_4 . En las BCSC con ánodos de Fe_2O_3 y H_2SO_4 0.01 M, la resistencia óhmica inicial del sistema fue de 3024 Ω , disminuyendo a 2253 Ω tras la adición de Na_2SO_4 , tal como se observa en las Figuras 22 y 23.

Cuando se utilizó sargazo 60 malla como materia orgánica, esta reducción fue aún más notable, alcanzando un valor mínimo de 173 Ω como se muestra en la Figura 24, donde se precia la disminución progresiva de la resistencia óhmica.

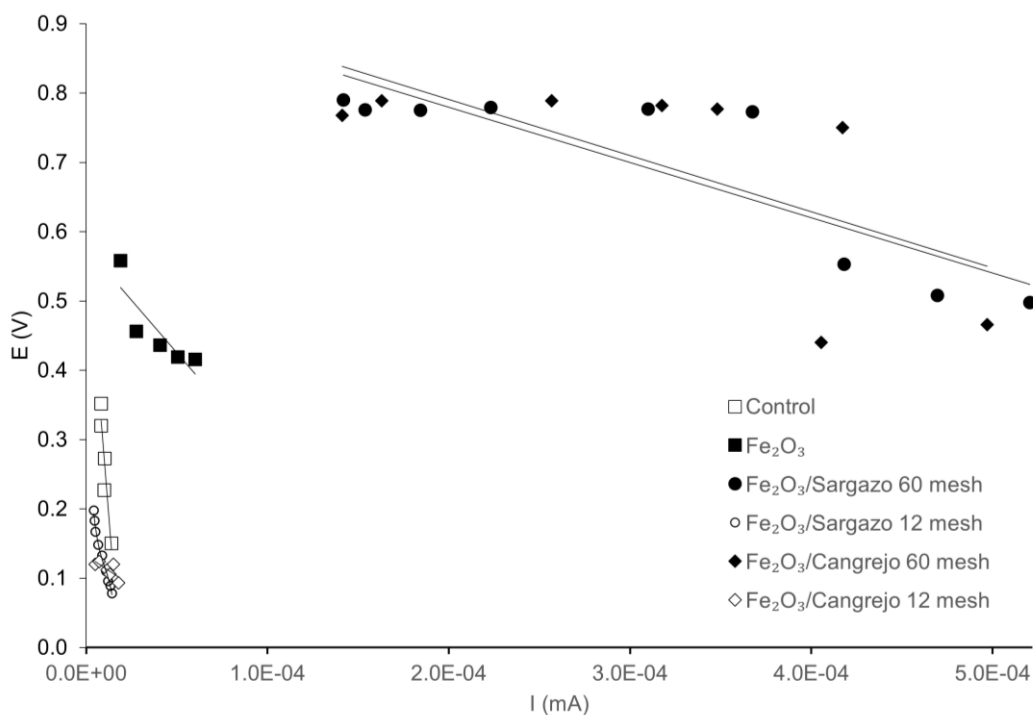


Figura 22. Región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 , pH 2.

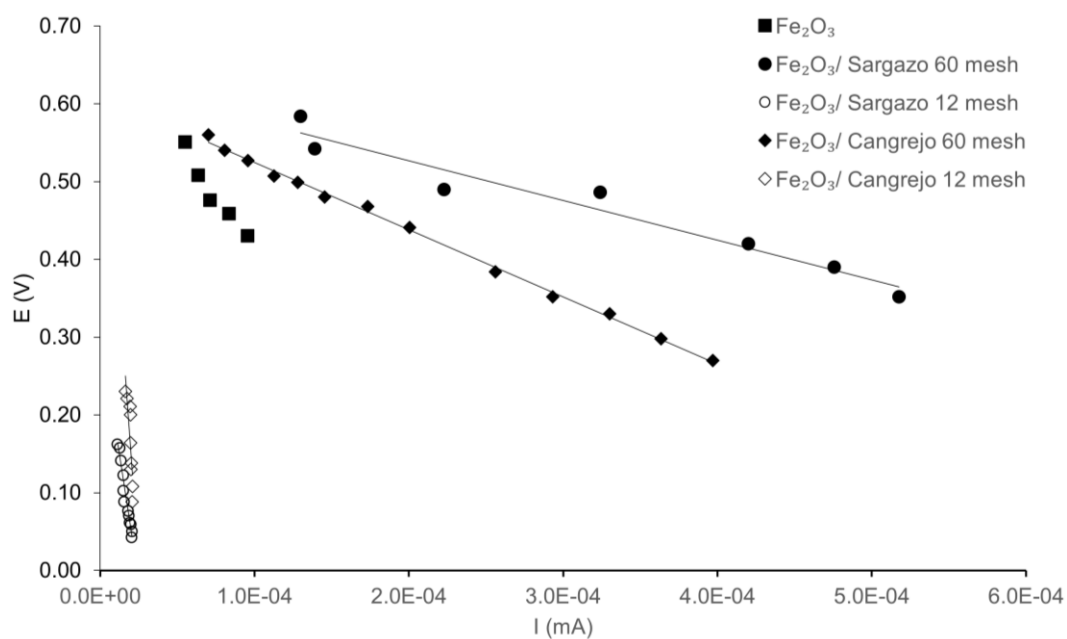


Figura 23. Región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.

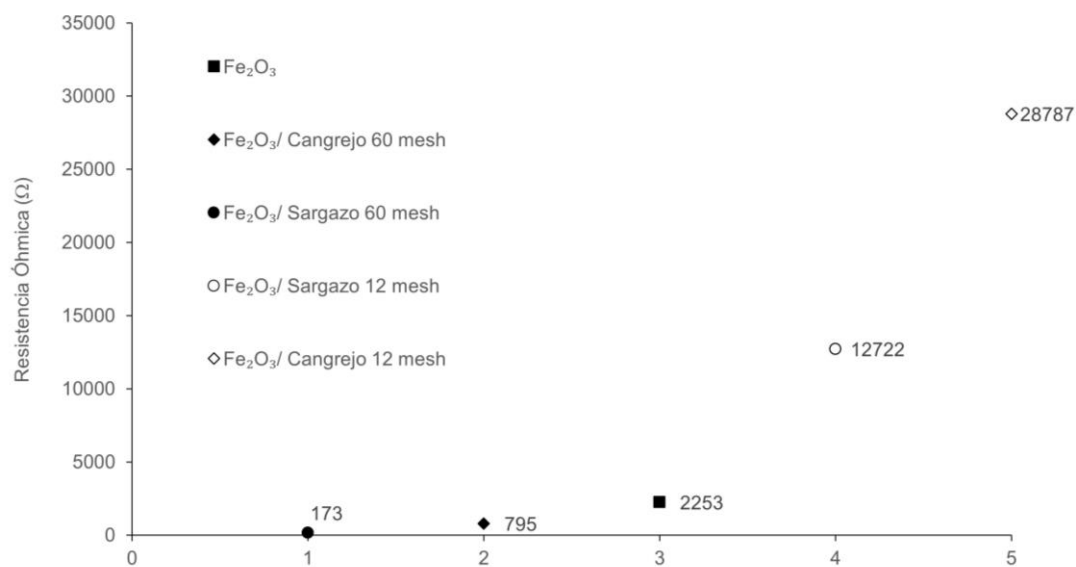


Figura 24. Descenso de la región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.

Las BCSC con ánodos de NTC también presentaron una reducción en la resistencia óhmica, aunque en menor medida. La resistencia inicial fue de 5009 Ω , disminuyendo a 4629 Ω con la adición de Na_2SO_4 , tal como se observa en las Figuras 25 y 26.

En el caso de las configuraciones con sargazo 60 malla, la resistencia óhmica se redujo de 4629 Ω a 865 Ω , mostrando un comportamiento menos eficiente en comparación con las BCSC con ánodos de Fe_2O_3 (Fig. 27).

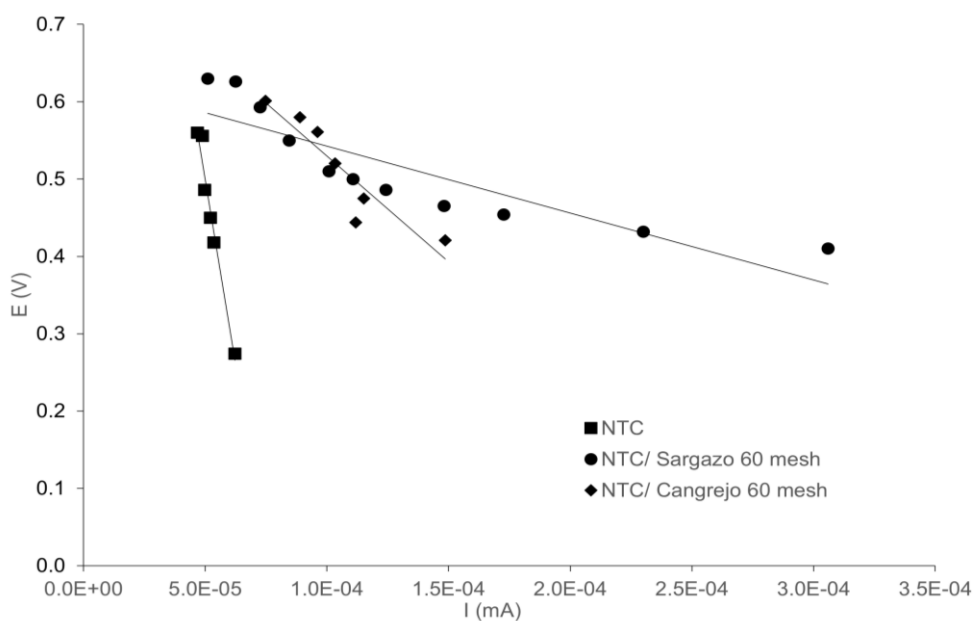


Figura 25. Región de resistencia óhmica de Bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 , pH 2.

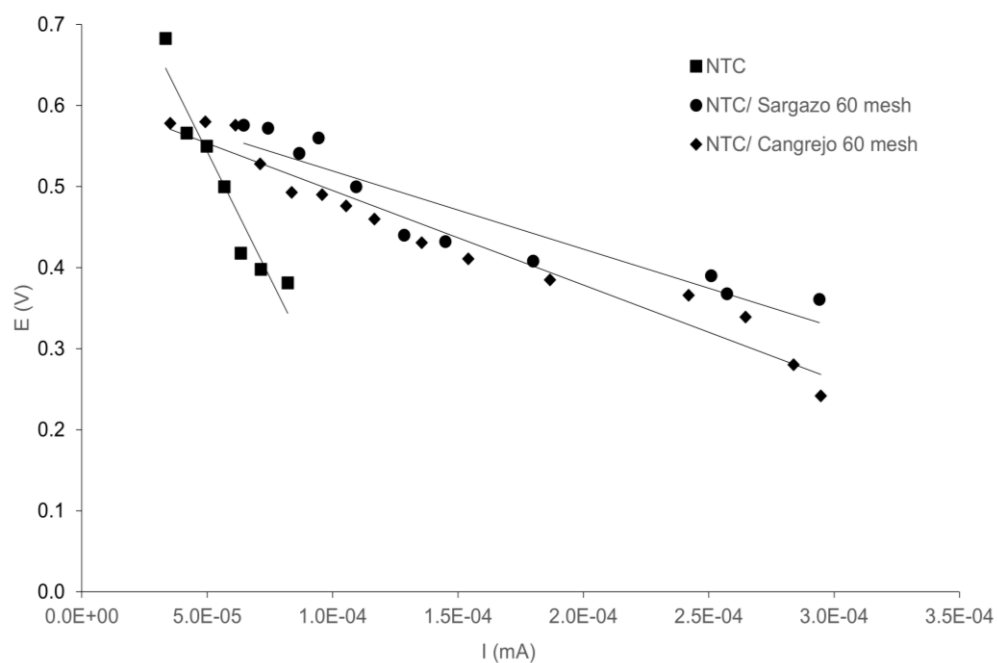


Figura 26. Región de resistencia óhmica de Bioceldas con electrodo de nanotubos de carbono con H_2SO_4 y Na_2SO_4 pH 2.

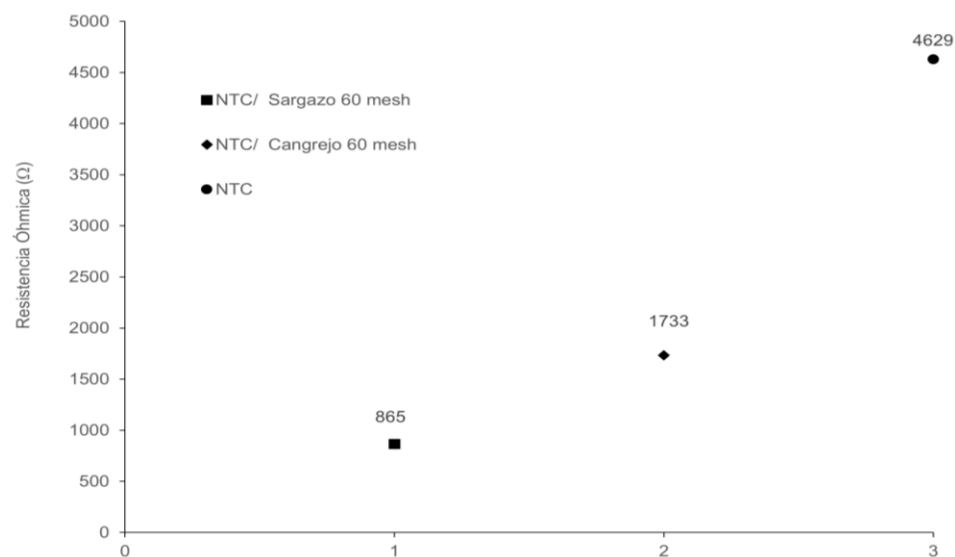


Figura 27. Descenso de la región de resistencia óhmica de bioceldas con electrodo de Fe_2O_3 con H_2SO_4 y Na_2SO_4 , pH 2.

El análisis de la resistencia óhmica mostró una reducción significativa con la incorporación de Na_2SO_4 . La BCSC con ánodo de Fe_2O_3 y sargazo 60 malla alcanzó la menor resistencia óhmica (173Ω), en comparación con la resistencia inicial de 32526Ω registrada en la celda control. Esta disminución resalta la efectividad de la combinación de óxidos de hierro, materia orgánica finamente particulada y un electrolito fuerte en la optimización de la transferencia de carga.

Las BCSC con ánodos de NTC también presentaron una reducción en la resistencia óhmica, aunque en menor medida, alcanzando un valor mínimo de 1180Ω con la combinación de sargazo 60 malla y Na_2SO_4 .

Al final de los ensayos experimentales se optó por mover un tercio de cátodo por fuera del catolito, esta acción tuvo un efecto determinante en el rendimiento electroquímico de las bioceldas. En la Figura 28 se muestra la comparación de las curvas de densidad de potencia entre la biocelda con el cátodo completamente sumergido y aquella con un tercio del cátodo expuesto al aire. Se observa que la biocelda con el cátodo parcialmente expuesto alcanzó una densidad de potencia máxima cercana a $1200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, mientras que la configuración con el cátodo sumergido registró aproximadamente $1026 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. Este incremento del orden del 30 % evidencia que la mayor disponibilidad de oxígeno atmosférico en la interfase aire/agua favorece la reacción de reducción de oxígeno, aumentando el potencial catódico y, en consecuencia, la densidad de potencia generada.

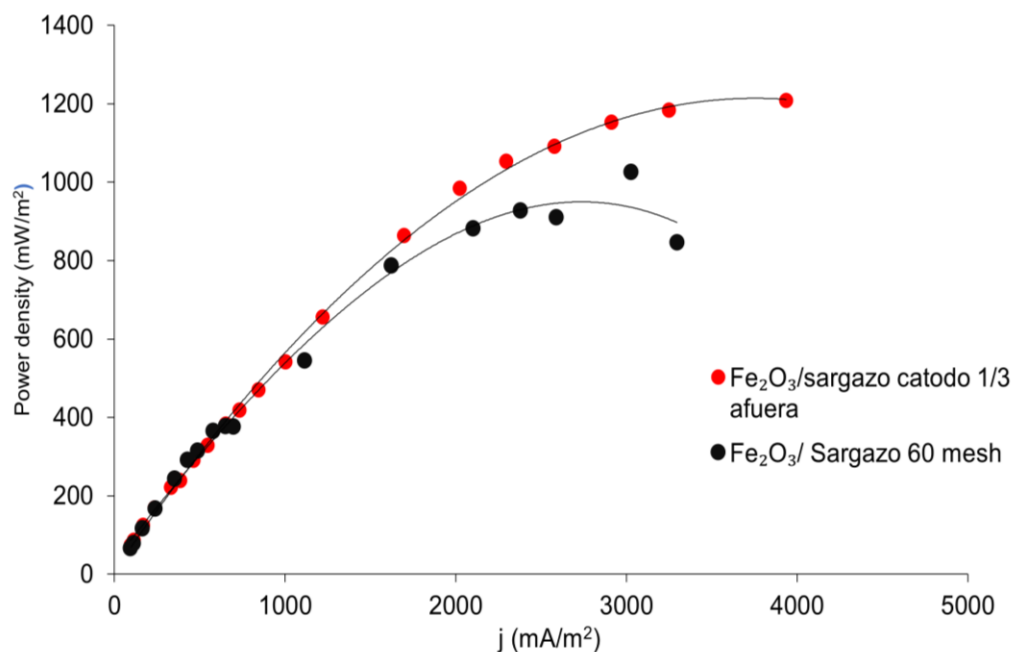


Figura 28. Curva de densidad de potencia biocelda Fe_2O_3 de 2 cm^2 , cátodo sumergido y biocelda con tratamiento térmico Fe_2O_3 de 2 cm^2 con 1/3 del cátodo expuesto, $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, pH 2.

En la Figura 29 se muestran las curvas de densidad de corriente para ambas configuraciones. Se observa que el cátodo parcialmente expuesto mantiene valores de potencial más altos (0.7 V) incluso a corrientes elevadas, lo que indica menor polarización catódica y una transferencia de carga más eficiente.

De acuerdo con la ecuación de Nernst, el potencial de reducción del oxígeno está directamente relacionado con su concentración en la superficie del electrodo. Por lo tanto, al aumentar la concentración local de O_2 debido al contacto con la atmósfera, el potencial catódico se vuelve más positivo, ampliando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Este efecto incrementa la corriente generada y reduce las pérdidas óhmicas internas.

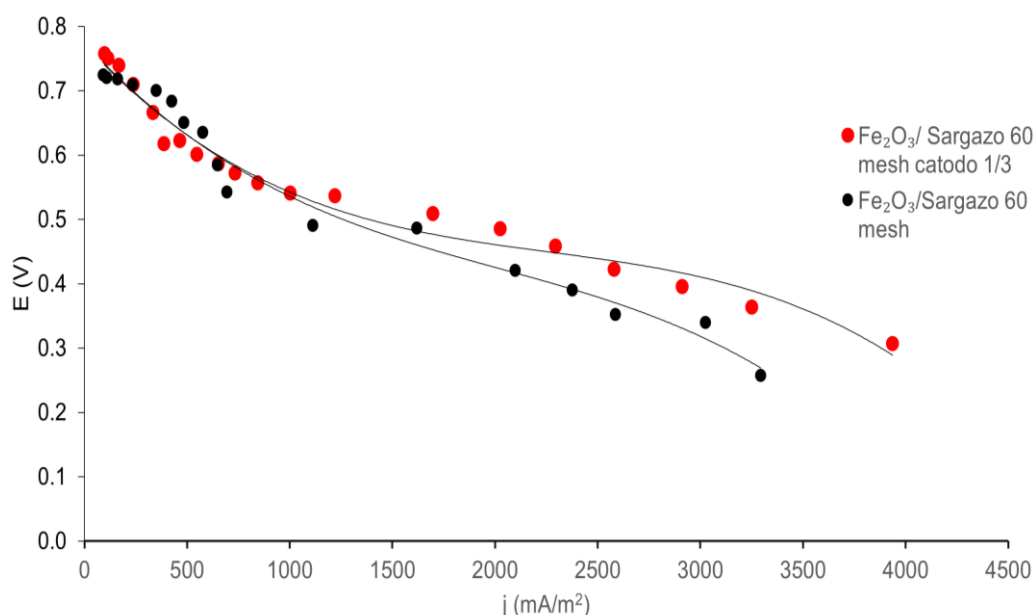


Figura 29. Curva de densidad de corriente biocelda Fe_2O_3 de 2 cm^2 , cátodo sumergido y biocelda con tratamiento térmico Fe_2O_3 de 2 cm^2 con $1/3$ del cátodo expuesto, $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, pH 2.

En la Figura 30, correspondiente a la región óhmica, se aprecia una pendiente menor para la biocelda con $1/3$ del cátodo expuesto, lo que indica una reducción de la resistencia interna. Esta tendencia se confirma cuantitativamente en la Figura 31, donde la resistencia óhmica disminuyó drásticamente en comparación con los sistemas de control: la biocelda $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Sargazo}$ 12 malla con el cátodo parcialmente expuesto presentaron valores de alrededor de 402Ω .

Estos resultados demuestran que la exposición parcial del cátodo mejora la difusión de oxígeno, aumenta su potencial electroquímico y reduce las pérdidas de energía por resistencia interna, generando así un sistema más eficiente.

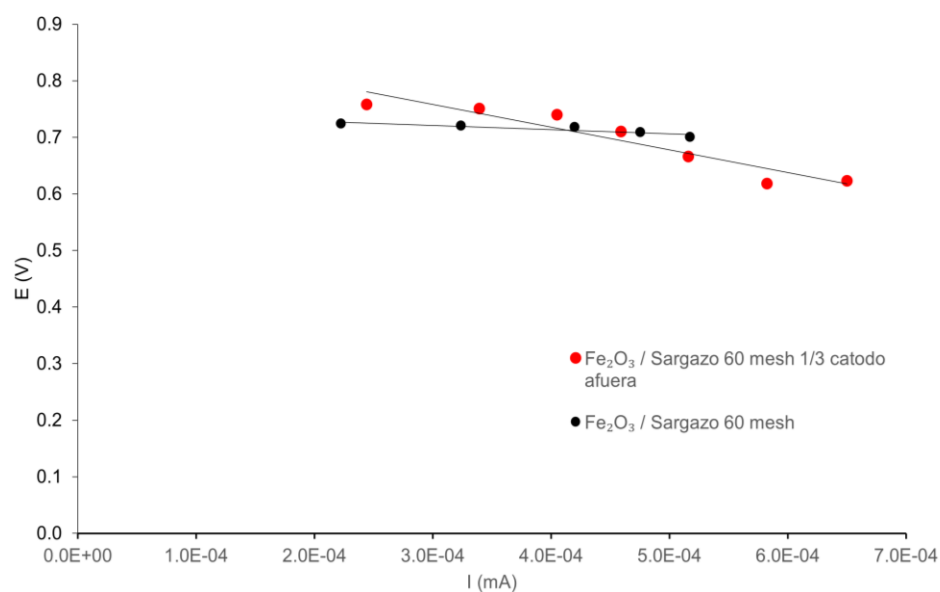


Figura 30. Resistencia óhmica en bioceldas Fe₂O₃ de 2 cm²: cátodo sumergido y con 1/3 del cátodo expuesto, 0.01M H₂SO₄ + Na₂SO₄, pH 2.

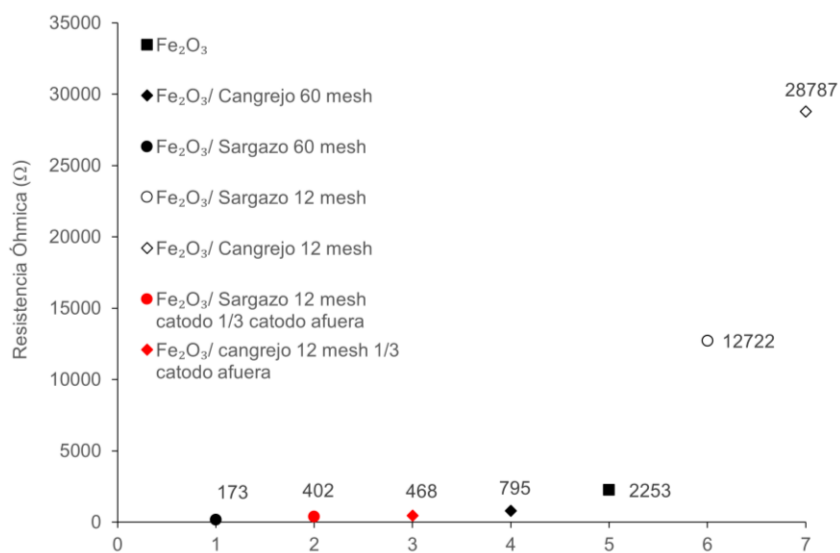


Figura 31. Resistencia óhmica comparativa de bioceldas con Fe₂O₃ de 2 cm² utilizando Sargazo y Cangrejo (12 y 60 mesh) con y sin exposición parcial del cátodo, 0.01 M H₂SO₄ + Na₂SO₄, pH 2.

4.6. CONCLUSIONES

Se demostró que es posible mejorar el desempeño electroquímico de las bioceldas de sedimento mediante modificaciones simultáneas en el ánodo, el cátodo y el medio electrolítico, utilizando materiales de bajo costo y residuos orgánicos disponibles localmente. La incorporación de ánodos modificados con óxidos de hierro (Fe_2O_3) incrementó la biocompatibilidad y favoreció la transferencia electrónica entre los microorganismos electrogénicos y el electrodo. Asimismo, la adición de biomasa residual como Sargazo (*Sargassum* spp.) y exoesqueleto de cangrejo, empleada como fuente de carbono y nutriente estructural, contribuyó a disminuir la resistencia interna de la biocelda y a mejorar la actividad microbiana dentro del sedimento, demostrando que estos residuos pueden ser valorizados dentro de sistemas bioelectroquímicos sostenibles.

De igual forma, el uso de una mezcla de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ como catolito permitió mejorar la conductividad iónica y estabilizar la región óhmica en las curvas de polarización. No obstante, el aporte más significativo en términos de eficiencia y producción energética fue la modificación en la configuración del cátodo, demostrando que exponer 1/3 del cátodo al oxígeno atmosférico aumentó el potencial del electrodo, redujo la polarización catódica y disminuyó la resistencia interna hasta en un orden de magnitud. Esta disposición mejoró la densidad de potencia hasta en 30 a un 33 % respecto al cátodo completamente sumergido, debido a la mayor disponibilidad de oxígeno para la reacción de reducción catódica.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que las bioceldas de sedimento son una alternativa viable para la producción descentralizada de energía, particularmente en zonas costeras o con cuerpos de agua donde existan residuos orgánicos aprovechables. Además, se valida que la eficiencia del sistema puede incrementarse mediante estrategias de diseño simples, económicas y sustentadas en fundamentos electroquímicos.

Bibliografía

- [1] P. Dange *et al.*, “A comprehensive review on oxygen reduction reaction in microbial Fuel cells,” 2022, *Tech Science Press*. doi: 10.32604/jrm.2022.015806.
- [2] “Bioelectrochemical Systems Vol.1 Principles and Processes.”
- [3] S. P. Jung and S. Pandit, “Important factors influencing microbial fuel cell performance,” in *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*, Elsevier, 2018, pp. 377–406. doi: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00015-7.
- [4] M. Zhou, M. Chi, J. Luo, H. He, and T. Jin, “An overview of electrode materials in microbial fuel cells,” May 15, 2011. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.012.
- [5] Q. Du, J. An, J. Li, L. Zhou, N. Li, and X. Wang, “Polydopamine as a new modification material to accelerate startup and promote anode performance in microbial fuel cells,” *J Power Sources*, vol. 343, pp. 477–482, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.093.
- [6] E. Abazarian, R. Gheshlaghi, and M. A. Mahdavi, “The effect of number and configuration of sediment microbial fuel cells on their performance in an open channel architecture,” *J Power Sources*, vol. 325, pp. 739–744, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.080.
- [7] D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels, and K. Vanbroekhoven, “A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production,” 2010, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.biortech.2009.10.017.
- [8] Universidad Veracruzana, “El sargazo en las costas mexicanas,” 2020.
- [9] SEMAR, “En 2020 se recolectaron 17,865 tons de sargazo, con el apoyo de los 3 órdenes de Gobierno, Sector Privado y población quintanarroense,” 2020.
- [10] SEMANART, “¿Sabes que es el Sargazo?,” 2018.
- [11] A. Alif, J. Baari, and A. Febryanti, “Performance Of Sediment Microbial Fuel Cells In Generating Electricity Using Fish Wastewater And Shrimp Wastewater As A Nutrient And Their Effect On Waste Quality.” [Online]. Available: <http://ijstm.inarah.co.id>
- [12] CONAPESCA, “Produjo México 47 mil 664 toneladas de camarón en la temporada de captura 2019-2020: Agricultura.”
- [13] D. Nosek, T. Mikołajczyk, and A. Cydzik-Kwiatkowska, “Anode Modification with Fe₂O₃ Affects the Anode Microbiome and Improves Energy Generation in Microbial Fuel Cells Powered by Wastewater,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/ijerph20032580.

- [14] B. Delord *et al.*, "Carbon nanotube fiber mats for microbial fuel cell electrodes," *Bioresour Technol*, vol. 243, pp. 1227–1231, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.06.170.
- [15] F. Rezaei, T. L. Richard, R. A. Brennan, and B. E. Logan, "Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems," *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 11, pp. 4053–4058, Jun. 2007, doi: 10.1021/es070426e.
- [16] T. Yamashita *et al.*, "Enhanced electrical power generation using flame-oxidized stainless steel anode in microbial fuel cells and the anodic community structure," *Biotechnol Biofuels*, vol. 9, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0480-7.
- [17] V. Chávez *et al.*, "Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities," *Water (Basel)*, vol. 12, no. 10, p. 2908, Oct. 2020, doi: 10.3390/w12102908.
- [18] J. J. Milledge and P. J. Harvey, "Ensilage and anaerobic digestion of Sargassum muticum," *J Appl Phycol*, vol. 28, no. 5, pp. 3021–3030, Oct. 2016, doi: 10.1007/s10811-016-0804-9.
- [19] E. Aleman-Gama *et al.*, "Oil-contaminated sediment amended with chitin enhances power production by minimizing the sediment microbial fuel cell internal resistance," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 894, p. 115365, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jelechem.2021.115365.
- [20] S. Z. Abbas, M. Rafatullah, N. Ismail, and M. I. Syakir, "A review on sediment microbial fuel cells as a new source of sustainable energy and heavy metal remediation: mechanisms and future prospective," Jul. 01, 2017, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/er.3706.
- [21] "bennetto".
- [22] U. Schröder, "Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 9, no. 21, pp. 2619–2629, 2007, doi: 10.1039/b703627m.
- [23] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, and I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review," *J Power Sources*, vol. 356, pp. 225–244, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109.
- [24] U. Schröder, "Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 9, no. 21, pp. 2619–2629, 2007, doi: 10.1039/b703627m.
- [25] B. E. Logan *et al.*, "Microbial fuel cells: Methodology and technology," Sep. 01, 2006. doi: 10.1021/es0605016.

- [26] B. E. Logan *et al.*, "Microbial fuel cells: Methodology and technology," Sep. 01, 2006. doi: 10.1021/es0605016.
- [27] V. V. Panić, R. M. Stevanović, V. M. Jovanović, and A. B. Dekanski, "Electrochemical and capacitive properties of thin-layer carbon black electrodes," *J Power Sources*, vol. 181, no. 1, pp. 186–192, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.03.048.
- [28] B. E. Logan *et al.*, "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology," *Environ Sci Technol*, vol. 40, no. 17, pp. 5181–5192, Sep. 2006, doi: 10.1021/es0605016.
- [29] M. Zhou, M. Chi, J. Luo, H. He, and T. Jin, "An overview of electrode materials in microbial fuel cells," May 15, 2011. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.012.
- [30] A. J. . Bard and L. R. . Faulkner, *Electrochemical methods : fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [31] M. Zhou, M. Chi, J. Luo, H. He, and T. Jin, "An overview of electrode materials in microbial fuel cells," May 15, 2011. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.012.
- [32] F. Rezaei, T. L. Richard, R. A. Brennan, and B. E. Logan, "Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems," *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 11, pp. 4053–4058, Jun. 2007, doi: 10.1021/es070426e.
- [33] Q. Zhao, H. Yu, S. Wang, W. Wang, and Z. Liang, "Microbial fuel cells-air-cathode electrodes," in *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*, Elsevier, 2018, pp. 319–327. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.13460-2.
- [34] N. N. Mohd Noor, N. I. Oktavetri, and K. Kim, "Effect of submerged and floating cathodes on sustainable bioelectricity generation and benthic nutrient removal in sediment microbial fuel cells," *Fuel*, vol. 367, p. 131438, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.131438.
- [35] L. Alvarez-Benítez, S. Silva-Martínez, A. Hernandez-Perez, S. K. Kamaraj, S. Z. Abbas, and A. Alvarez-Gallegos, "Quantification of Internal Resistance Contributions of Sediment Microbial Fuel Cells Using Petroleum-Contaminated Sediment Enriched with Kerosene," *Catalysts*, vol. 12, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.3390/catal12080871.
- [36] F. Rezaei, T. L. Richard, R. A. Brennan, and B. E. Logan, "Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems," *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 11, pp. 4053–4058, Jun. 2007, doi: 10.1021/es070426e.
- [37] Shanmuganathan P and Rajasulochana P, "Article ID: IJMET_09_09_017-Available online at Cite this Article: Shanmuganathan. P, Ramachandra Murthy. A and Rajasulochana. P, Factors Affecting the Performance of Microbial Fuel Cells,"

International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET, vol. 9, no. 9, pp. 137–148, 2018, [Online]. Available: <http://iaeme.com/Home/journal/IJMET137editor@iaeme.com><http://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=9&Issue=9><http://iaeme.com>

- [38] Food and Agriculture Organization of the United Nations, “The State of World Fisheries and Aquaculture 2020,” *FAO*, 2020.
- [39] V. Chávez *et al.*, “Massive influx of pelagic sargassum spp. On the coasts of the mexican caribbean 2014–2020: Challenges and opportunities,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 10, pp. 1–24, Oct. 2020, doi: 10.3390/w12102908.
- [40] H. Kim, S. Kang, and B.-I. Sang, “Metabolic cascade of complex organic wastes to medium-chain carboxylic acids: A review on the state-of-the-art multi-omics analysis for anaerobic chain elongation pathways,” *Bioresour Technol*, vol. 344, p. 126211, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126211.
- [41] “etzicollerpascuzzi2020”.
- [42] H. D. Abdollahpoor, M. Rahimnejad, M. Mashkour, S.-E. Oh, and F. Soavi, “Optimizing power generation in sediment microbial fuel cells through multi-electrode configurations,” *J Taiwan Inst Chem Eng*, p. 105809, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jtice.2024.105809.
- [43] D. Cheng *et al.*, “Performance of microbial fuel cell for treating swine wastewater containing sulfonamide antibiotics,” *Bioresour Technol*, vol. 311, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123588.
- [44] T. Yamashita *et al.*, “Enhanced electrical power generation using flame-oxidized stainless steel anode in microbial fuel cells and the anodic community structure,” *Biotechnol Biofuels*, vol. 9, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0480-7.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Cuernavaca, Morelos, 05 de febrero de 2026.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: MODIFICACIÓN DE ÁNODOS DE ACERO INOXIDABLE PARA AUMENTAR LA GENERACIÓN DE POTENCIA EN UNA BIOCELDA DE SEDIMENTO DE COMBUSTIBLE, que presenta el alumno **Jorge Roberto Arenas Domínguez**, para obtener el título de la **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ

DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ

DRA. LORENA MAGALLÓN CACHO

DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS

Se adiciona efirma UAEM



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65,
Tel. 777 329 70 00 Ext. 6208 / ciicap.posgrado@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ALBERTO ARMANDO ALVAREZ GALLEGOS | Fecha:2026-02-05 19:39:02 | FIRMANTE

ClXqhUu623SLaD25dFRSGPXDD9KdIf8NQ015gZoMql3pWGmSnpFhJryqm8seh0W68255eH89E6476sfXCs1iwMu3U2oigMDRBAY1rng0+jMJzq7Ba3NrSTOlt0vqQ216pViGDif3yJKKfSdWke2iEmdAqsj3Coi7k+RGYJlJijQv+COEzLtlfIH9Jxd26ed51KOq8J3jTImC5N8SipxTgC0FbhlEFqjxD8tEkrjTKr/xHZRe0MmefZWVWoCholSUD0azf11mFaqHyp+5fU14zuBeY47SS4WgH5XEX4O6su+pNjirchpAX2TQPmXKuEbfE/3+s2/V526827jRn4r6A==

JOSE ALFREDO HERNANDEZ PEREZ | Fecha:2026-02-06 06:24:37 | FIRMANTE

fwNqC3gBZ40OBPK/xqG6Dw4Q3pUFD60DR6ikiJxW9Xs4407MTJ8ATxiVfls2Q+ieYilOqFEnUcbE0tsZBm+0LZ4FqEVhVRbw0mkHh/NMtyPa4newDwHY9mKT+HWe0vh6g+rBgblkdS6FMTpJmLWYHwvPcXmMMfDiPaU8lcDnlet2fn1oSXhqq5kgnuHoAEOJutd+ARCyAVfSik6Diccl15BJBC0WwrlfxpOkTrASSo/yLFs8inP2N+P1RmCtODo+yTxLZIGmZwZukoDW/kiAdcZTYHGZ4BOzDkP3NxlKscG4s0C6QkXtKYgd/NY5KVcHmyFhYq45oMYqWS7ehtA==

SUSANA SILVA MARTINEZ | Fecha:2026-02-06 11:08:14 | FIRMANTE

mDfkhWlmDvPYh2vj5K5OBMOshjLbXkiklxuFu3bDHbgsloEO9D7dltpyl6a1hQqEQEp9BvgaU22YS3MxtBFDvLN8lQBZVsxpjyU/WrmzT3UJFqJQkt0Eyc/Ol0y381zgo+hycBUTIsfOU/YscfL/NRW71jxYpFmx8lkEbZF9TZJFHRADVuP6wpGCUhbFC0AJjJIMUmJUPKtFHRbkkJhKno0ep/Z71EmQ2XSjzVphOvz9Bio+kzOgaYh8LwhMjzFR2I2aOGdBH/laORrKVOcdRah4ZtlHpgnAH+YbX9E03ZLZqGj3Jcg+hli2tmdsSKqfOvov1Z+RzrCXCSEfZyp9TA==

LORENA MAGALLÓN CACHO | Fecha:2026-02-09 12:37:45 | FIRMANTE

jw0KI/QHp/WYiH3ekYTZIO7wKDP6itG9E/2Nkzz/p2ZLukfay1KnA46QnQ3v2IKZ82E/jfYUmAJ6CyEh+MgHFODXyY9peUnLWQ/sDfho3ccHMBZrjYdoCUOcRJAb0D3iiiVjKyrMkMZjp7s35TVODEXR/dBvNpTfC2rcVyatWV6HejwHI21rRqlpb57xnd195TYhppvfRVIm6KZ8/Vc8fR3D5aFodGpSqQe59LL7W3j4McmpBX/FNcPrbcOkcalVK2pnJoRTD3FoPzGWlWkuF3vqCkP6+0Fvc2oqKOV5JX9lshgjmJbFGMpa/JrKelefbCLvdrT4WJu6WkjiX+VIA==

ARMANDO HUICOCHEA RODRIGUEZ | Fecha:2026-02-16 14:40:49 | FIRMANTE

BogZxIES1P42SYVWIHlc46/3IRW9zvnwFxFIEEGDfKOlalnX+PkKtVRMkyJTrboAoYu4OoX7X06nlmRPFJRLOZpfhoINO5EnJCRn7M/nYwL4ocZ/XaYilSFnoQ8/Fy7i9DN/fzJQel+HxeMFTbu3VyQ1OF3BrQnt9UpHZ7k3Szk0eAYCTsd/97Yv1TJQn/4lQGS3snP8U7i97lQDI9dN7j5gce4pFn5cZ5z8sUdc7g/gMDR6TDGRIZWMbXP8CpoTihJqE2GyOrSvfjarnESKfoJD1pMCEdYvmQYJx9B9IR3xJbJK3tabd1Vvdd6lY1sBdoqfpx6JQNYJ3tVhWK64Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



EuMOox2kL

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/bKO4JNmJe7nON441KUMQFTH2XsX2rqAy>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029