



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

---

---

ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC.

LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS.

EMPLEO DE SEDIMENTOS DE JAGÜEY EN UNA CELDA DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANA BÉNTICA PARA LA  
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERO INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS**

PRESENTA

**ANA FERNANDA LORENZANA RAMÍREZ**

**DIRECTORA:** DRA. MARÍA DEL CARMEN FUENTES  
ALBARRÁN

**CODIRECTOR:** DR. FIDEL BENJAMÍN ALARCÓN  
HERNÁNDEZ

## DEDICATORIA

A mis abuelos Sara y Carlos, gracias por ser mi principal motor y apoyarme siempre en este arduo camino llamado vida; porque ustedes siempre me encomendaron a Dios y es Él quien me ha permitido llegar hasta aquí el día de hoy.

Sarita, sé que no pudiste presenciar esto de manera terrenal, pero espero que donde te encuentres puedas verlo.

Carlitos, gracias por siempre estar ahí, cuidar de mí y no dejar que me rindiera.

Ustedes me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia. Ustedes me han inspirado con su sabiduría y ejemplo de trabajo duro. Su amor, respeto y cariño han sido una guía fundamental en mi desarrollo personal y académico. Gracias por creer en mí, por alentarme en cada paso y por su constante apoyo.

Gracias a Dios por permitirme tenerlos como mis abuelitos, ustedes deberían ser eternos.

Es por eso y más que esta tesis se las dedico a ustedes, porque sin ustedes y Dios, esto no hubiese sido posible.

¡Lo logramos!

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por siempre cuidar de mí, haberme enviado a dos hermosos ángeles en mi vida, darme sabiduría e inteligencia y por haberme permitido llegar hasta aquí; porque tus planes son perfectos.

A mis abuelos, por siempre apoyarme y nunca soltarme.

A mi madre, por haberme apoyado en mi formación profesional y académica.

Al amor de mi vida, por ser mi pilar más grande, mi apoyo y fortaleza en los momentos más difíciles, y por animarme a seguir aun cuando estaba por darme por vencida.

A los Dres. María del Carmen y Fidel Benjamín por ser mi guía y apoyo en este proceso y orientarme.

A todos aquellos que fueron mis docentes, por sus enseñanzas y haberme formado como profesional y persona.

A mis amigos, por su ayuda, apoyo y confianza.

# Índice

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
Capítulo 1. Introducción. ....	9
1.1. Antecedentes. ....	9
1.2. Combustibles fósiles y energías renovables .....	13
1.3. Celdas de combustible microbianas bénticas. ....	16
1.4. Objetivos. ....	18
1.4.1. Objetivo general.....	18
1.4.2. Objetivos particulares. ....	18
Capítulo 2. Marco teórico. ....	19
2.1. Celdas de combustible microbianas.....	19
2.2. Celda de combustible microbiana béntica (CCMB).....	22
2.3. Consideraciones para el diseño de una CCMB.....	24
2.4. Electrodo catódico. ....	25
2.5. Cátodos aireados.....	25
2.6. Electrodo anódico.....	26
2.7. Microbiología en una CCMB. ....	27
2.8. Adición de nutrientes.....	28
2.9. Desempeño de las CCMs .....	30
2.9.1 Resistencia interna de una CCM .....	33
Capítulo 3. Metodología. ....	33
3.1. Recolección de sedimentos. ....	33
3.2. Configuración y operación de la CCMB. ....	34
3.3. Electrodo. ....	35

3.3.1. Ánodo.....	35
3.3.2. Cátodo.....	35
3.4. Ensamble de la celda.....	36
3.5. Aclimatación de la CCMB (Start-up).....	39
3.5.1. Determinación de la resistencia interna del sistema.....	40
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	40
4.1. Aclimatación de la CCMB.....	40
4.2. Voltaje como una función de la resistencia externa.....	43
4.3. Curva de polarización.....	44
4.4 Cálculo de la resistencia interna.....	46
4.5 Densidad de potencia producida por la CCMB.....	47
Capítulo 5. Conclusiones.....	49
Capítulo 6. Recomendaciones para futuros trabajos.....	50
Capítulo 7. Referencias.....	51

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> Detalles principales de una CCM de cámara doble [Due et al, 2007]..	19
<b>Figura 2.2</b> Detalles principales de una CCMB [Lovley, 2006].....	23
<b>Figura 3.1</b> Ubicación del jagüey con respecto a la Universidad (Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc). .....	33
<b>Figura 3.2</b> Recolección de los sedimentos tomados del jagüey. ....	34
<b>Figura 3.3.</b> Esquema de las interfases sedimento-agua en la CCMB. ....	34
<b>Figura 3.4</b> Fibra de carbón. ....	35
<b>Figura 3.5</b> Fibra de carbón Veil. ....	36
<b>Figura 3.6</b> Fibra de carbón convencional (izquierda) y fibra de carbón Veil (derecha) con tela de algodón cosida alrededor.....	36
<b>Figura 3.7</b> Limpieza de la pecera. ....	37
<b>Figura 3.8</b> Montaje de los sedimentos y colocación del ánodo de la celda. ....	37
<b>Figura 3.9</b> Ensamble del cátodo y llenado con agua. ....	38
<b>Figura 3.10</b> Montaje final de la CCMB.....	38

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.1</b> Demanda mundial de energía primaria, 2004 [International Energy Agency (IEA), 2006]. *(Mtep) Millones de toneladas equivalentes de petróleo. ....	10
<b>Tabla 1.2</b> Estructura de la generación eléctrica, 2004 [International Energy Agency (IEA)]. *(TWh) Tera Vattios hora. ....	11
<b>Tabla 1.3</b> Impacto ambiental de la generación eléctrica [Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2000]......	12
<b>Tabla 2.1</b> Materiales de electrodos anódicos [González, 2019]......	26
<b>Tabla 4.1</b> Bitácora de comportamiento de la CCMB. ....	41

## Índice de gráficas

<b>Gráfica 2.1.</b> Curva de polarización ideal para una celda de combustible microbiana. .....	31
<b>Gráfica 4.1</b> Tiempo de aclimatación de la CCMB. ....	42
<b>Gráfica 4.2</b> Voltaje de la CCMB en función de la resistencia. ....	44
<b>Gráfica 4.3</b> Voltaje de la CCMB expresado en función de la corriente. ....	45
<b>Gráfica 4.4</b> Resistencia interna de la CCMB. ....	47
<b>Gráfica 4.5</b> Densidad de potencia de la CCMB. ....	48



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

La energía está fuertemente cohesionada con la materia, por lo que todo fenómeno material se asocia a la energía, esto ha provocado que la energía se convierta en algo indispensable para la vida, por lo que su uso está indudablemente ligado con la actividad humana, tanto así que la cantidad de energía consumida *per cápita* es empleada como uno de los indicadores del nivel de desarrollo de un país.

La existencia de la energía primaria (recursos energéticos), sin importar su tipo, localización y cuantificación no garantiza que puedan ser empleados para la obtención de energía final (energía útil). Para que se pueda generar energía útil es indispensable que el recurso energético usado sea técnicamente explotable, económicamente rentable y energéticamente competitivo, por lo que es esencial la existencia de la pericia y los medios técnicos que hagan posible su obtención, sin embargo, cabe mencionar que el costo del conjunto de operaciones relacionadas con su puesta en el mercado debe ser tal que su precio final sea competitivo con otros productos energéticos, y que la energía obtenida de un recurso debe ser superior a la que es consumida para lograr su puesta en funcionamiento. Al cumplir todos los requisitos mencionados anteriormente, los recursos energéticos pasan a ser denominados reservas energéticas, y se les puede transformar en energía útil en condiciones económicamente rentables. La generación de reservas energéticas incrementa el abaratamiento de los costes de explotación (extracción y comercialización), y con ello, el aumento de los precios de mercado de los productos energéticos.

Se considera que el consumo energético mundial es aproximadamente de 50 teravatios al año (cada teravatio equivale a mil gigavatios). Un gigavatio es representativamente la capacidad de generación de una usina eléctrica basada en carbón, o también tres veces el poder de generación de la más grande usina nuclear del mundo (IEA, 2022). En la Tabla 1.1 se describe la demanda mundial de energía primaria.

El consumo energético mundial tiene un valor de treinta y tres trillones de dólares (precios de 2022); a grandes trazos, constituye el 10% del PBI global (IEA, 2022).

De las diversas fuentes de energía primaria, solamente el carbón, el petróleo, el gas natural, la energía hidráulica y la energía nuclear tienen importancia económica, de modo que las restantes fuentes energéticas, a excepción de la “biomasa tradicional”, que tiene un peso notable en los países en vías de desarrollo, tienen una incidencia actual insignificante. En los cinco años previos al 2008, los precios del petróleo aumentaron en un 370%; los del carbón, el 460%; y los del gas natural, el 120% (Castro, 2011).

En la Tabla 1.1 se muestran las cantidades de la demanda mundial de energía primaria, cuantificadas en Tera Watts por hora (TWh).

**Tabla 1.1** Cambio en la generación eléctrica en el Escenario de Políticas Declaradas entre 2021 y 2030, 2022 [International Energy Agency (IEA), 2022]. \*(TWh) Tera Watts por hora.

Recurso energético	TWh	%
Solar	3008	27
Viento	2733	24
Gas natural	295	3
Petróleo	3140	28
Nuclear	575	5
Carbón	1157	10
Biomasa	238	3
Total	11146	100

El petróleo, el carbón y el gas natural aportan poco más del 41% de la demanda total para la satisfacción de las necesidades energéticas mundiales. Si se añaden las aportaciones de la energía nuclear y de los aprovechamientos eléctricos, la cifra se eleva al 56%.

En el caso de las energías finales, las que tienen una mayor importancia económica son los derivados del petróleo (tales como gasolina, gasóleos, gases licuados, etc.), el gas natural y la electricidad, que en conjunto llegan a representar más del 70% del total de la energía consumida a nivel mundial (Castro, 2011).

La estructura para la generación de energía eléctrica es aquella que merece una consideración especial, debido a la importancia que tiene su consumo, así como por la contaminación relacionada con los diversos sistemas de generación utilizados. El carbón en conjunto con la energía hidráulica son los recursos energéticos tradicionales que han sido empleados en la producción de electricidad, complementados por centrales que son alimentadas por derivados del petróleo, así como por energía nuclear, y en años recientes por gas natural. Sistemas de generación eléctrica que tienen su base en los recursos geotérmicos, eólicos, solares, biomasa y residuos tienen un peso mínimo en la producción del sector eléctrico (IDEA, 2000). En la Tabla 1.2 se muestra la estructura de la generación eléctrica.

**Tabla 1.2** Estructura de la generación eléctrica, 2004 [International Energy Agency (IEA)]. \*(TWh) Tera Vatios hora.

<b>Sistema de generación</b>	<b>TWh</b>	<b>%</b>
Carbón	6,945	39.8
Petróleo	1,169	6.7
Gas	3,420	19.6
Nuclear	2,740	15.7
Hidráulica	2,809	16.1
Geotérmica	367	2.1
<b>Total</b>	<b>17,450</b>	<b>100.00</b>

Referente al impacto ambiental que generan los diversos sistemas de producción de energía eléctrica, la Asociación de Productores de Energías Renovables llevó a cabo un trabajo entre los años 1998 y 2000 sobre el impacto ambiental (daños a los ecosistemas y a la salud) de diferentes opciones de generación de la energía eléctrica presentes, fundamentado en el detallado análisis del ciclo de vida de los diferentes sistemas de generación. En la Tabla 1.3 se presentan, valorados en “unidades de impacto”, los resultados de dicho trabajo.

**Tabla 1.3** Impacto ambiental de la generación eléctrica [Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2000].

<b>Sistema de generación</b>	<b>Valor del impacto.</b>
Lignito	1,735
Petróleo	1,398
Carbón	1,356
Nuclear	672
Fotovoltaica	461
Gas natural	267
Eólica	65
Minihidráulica	5

Es importante destacar que la producción de energía eléctrica sigue siendo la primera fuente de contaminación atmosférica, debido a su mayoritario origen en las centrales termoeléctricas; por lo que la reducción o estabilización de la contaminación atmosférica conlleva la racionalización del consumo energético, el fomento de las energías renovables y el retorno de la energía nuclear. Sin embargo, esta última, aunque cuenta con diversas ventajas; tales como costes de funcionamiento bajo, no produce gases de efecto invernadero y se trata de una energía constante y panificable durante todo el año, su mayor desventaja es la generación de residuos a partir del material utilizado, los cuales podrían causar posibles accidentes o fugas.

En la actualidad, México cuenta con energía renovable abundante, así como un marco legal, una estrategia y un plan específicos que permitirían una mayor participación de las energías renovables.

## **1.2. Combustibles fósiles y energías renovables**

Los combustibles fósiles consisten en depósitos de organismos fósiles que en una ocasión estuvieron vivos. Se llama combustibles fósiles a los hidrocarburos (petróleo y gas) y al carbón. Estos recursos se formaron durante siglos a partir de materia orgánica proveniente de plantas, microorganismos, bacterias y algas, que mediante la fotosíntesis transformaron en energía química la energía electromagnética del sol. Es materia orgánica, acumulada hace cientos de millones de años en el fondo de lagos o mares.

Los combustibles fósiles constituyen la base de la economía global y la civilización occidental. Por muchos milenios la población humana no rebasó los 500 millones de individuos, que tenían que utilizar el trabajo animal y humano como la principal fuente de energía. El crecimiento exponencial de la humanidad de los últimos tres siglos ha ocurrido gracias al gran incremento de la energía disponible asociada al uso masivo de los combustibles fósiles. Desde que se empezó a usar el carbón fósil como fuente de energía con la Revolución Industrial la población mundial inició a crecer de manera aritmética y desde que inició el uso sistemático del petróleo el crecimiento ha sido exponencial. A final de 2019 se han alcanzado los 7,700 millones de seres humanos, una cifra 7 veces mayor al momento en que se empezó a usar el petróleo. En buena medida esto se debió a la mecanización del campo y a la aplicación sistemática de los pesticidas y fertilizantes en la agricultura, que han permitido que la productividad agrícola se incrementara enormemente. Trabajo mecánico, irrigación, pesticidas y fertilizantes derivan directamente del uso de petróleo y gas natural, sin los cuales la agricultura solo podría soportar una mitad de la población actual. El uso de la energía fósil permitió también que una buena parte de la población no tuviera que trabajar en la agricultura y se pudiera dedicar a la ciencia, la tecnología, la cultura y las artes, que tuvieron un desarrollo igualmente espectacular. De la misma forma este excedente de energía fósil ha permitido una

explotación de los recursos naturales y de los ecosistemas del planeta a un ritmo nunca imaginado. En la actualidad los combustibles fósiles constituyen el 80% de la energía que se usa en el mundo (32% petróleo, 21% gas y 27% carbón) y cerca del 67% de las fuentes con que se produce electricidad (5% petróleo, 22% gas y 40% carbón). En el campo del transporte la dependencia de los combustibles fósiles es aún más significativa ya que los derivados del petróleo constituyen el 95% de las fuentes de energía (Castro y Cerda, 2012).

En el año 2008, la energía total que se consumió correspondió a la producción continua de una capacidad instalada mundial equivalente a 15 TW (Tera Watts), y se estima que para el año 2050 se requerirán tener 55 TW. Esto es, en solo 42 años deberemos de duplicar la actual capacidad de generar energía para satisfacer la demanda creciente de la misma (IEA, 2022).

Los combustibles fósiles están disponibles en grandes cantidades fáciles de obtener y transportar. Sin embargo, existen claros signos en la actualidad de que las fuentes de suministro de combustible fósiles son limitadas y se agotan, ya que su reposición podría tardar siglos

Hoy en día el uso de los combustibles fósiles supone un importante problema de sostenibilidad, tanto por motivos ambientales, como económicos.

Debido a los cambios climáticos y al calentamiento global que se han venido gestando desde el inicio de la revolución industrial, se impone la necesidad urgente de un sistema de obtención de energía eficiente y sostenible.

Nuestro mundo cada día requiere más y más energía, pero los combustibles fósiles y la energía nuclear representan una amenaza más que una solución, dadas sus consecuencias en la salud humana y en el balance climático del mundo. Allí es cuando las energías limpias se hacen tremendamente necesarias.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), frente a las fuentes convencionales, las energías renovables son “recursos limpios cuyo impacto ambiental negativo es prácticamente nulo y siempre reversible”. También, las energías renovables se pueden definir como aquellas que se obtienen de fuentes

naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales (IDAE, 2008).

El crecimiento poblacional, junto con sus necesidades energéticas y el avance industrial, está provocando el agotamiento de recursos fósiles e importantes problemas de contaminación ya que su combustión genera gran cantidad de gases. Estos gases se convierten en una de las principales fuentes de contaminación atmosférica debido a que contribuyen al aumento del efecto invernadero, lluvia ácida y, en consecuencia, al calentamiento global.

Estos eventos han despertado el interés de las comunidades científicas y tecnológicas para la búsqueda de nuevas fuentes de energías alternativas que permitan solucionar estos problemas. Los ritmos de crecimiento de los referidos eventos sugieren la necesidad de una nueva revolución industrial a nivel mundial en la cual los recursos de energía sean económicos, accesibles y sustentables (Chu & Majumdar, 2012).

El crecimiento de las energías limpias es imparable, como queda reflejado en las estadísticas aportadas en 2015 por la Agencia Internacional de la Energía (AIE): representan cerca de la mitad de la nueva capacidad de generación eléctrica instalada en 2014, toda vez que se han constituido en la segunda fuente global de electricidad, sólo superada por el carbón.

De acuerdo con la AIE, la demanda mundial de electricidad aumentará un 70% hasta 2040, elevando su participación en el uso de energía final del 18% al 24% en el mismo periodo espoleada principalmente por regiones emergentes (India, China, África, Oriente Medio y el sureste asiático) (Agencia Internacional de la Energía, 2015).

México cuenta con abundantes recursos renovables y se han hecho esfuerzos importantes para avanzar en el uso de las tecnologías que aprovechan las fuentes de energía renovable (ER) ya que es urgente una utilización más racional de la energía y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía primaria. Es inevitable preguntarse si existen fuentes energéticas suficientes que puedan sustituir a las fuentes fósiles y que permitan un desarrollo sustentable. Este proceso de transición se debe lograr sin tensiones geopolíticas dramáticas por el

control de los yacimientos de los hidrocarburos y sin la degradación irreversible del medio ambiente natural, particularmente debida a las emisiones de gas de efecto invernadero.

Existen las fuentes renovables de energía; la energía solar que en sus diversas manifestaciones directas (radiación solar directa, difusa) o indirectas (biomasa, eólica, hidráulica, mareomotriz) es la fuente de energía más abundante en la Tierra, además de la geotermia (Ferrari, 2013).

Una alternativa a esta problemática pueden ser los sistemas bioelectroquímicos (SBE) los cuales permiten generar energía y remover compuestos presentes en diversos sustratos. Gracias a los estudios realizados por diferentes investigadores en años pasados, se ha generado una nueva forma de producir energía eléctrica a base de microorganismos, la cual es conocida como celdas de combustible microbianas (CCMs), la cual es una tecnología novedosa.

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos electroquímicos que convierten energía química en energía eléctrica, empleando microorganismos como biocatalizadores, y ofrecen la posibilidad de generar bioelectricidad a partir de recursos orgánicos y biomasa renovable (Lovley, 2006). Las CCMs son capaces de utilizar una gran variedad de sustratos como combustible, tales como glucosa y acetato, asimismo pueden emplear microorganismos provenientes de lagos, mares o lodos residuales. Recientemente, se han realizado esfuerzos para la utilización de aguas residuales en las CCMs, debido a los problemas ambientales que estas representan y a la necesidad de su reutilización (Mora y Bravo, 2017).

### **1.3. Celdas de combustible microbianas bénticas**

Las celdas de combustible microbianas pueden convertir directamente la energía química de un sustrato orgánico a energía eléctrica a través de una serie de reacciones redox. Esta tecnología de biorreactores innovadores puede utilizar un amplio rango de sustratos orgánicos solubles e insolubles presentes en desperdicios y aguas residuales, así como aquellos presentes en la biomasa renovable, ofreciendo beneficios duales de generación de energía renovable en forma de electricidad con simultánea remediación de residuos, por lo que son



considerados como procesos ecológicamente amigables. (Tremblay y Zhang, 2015).

Las CCM utilizan el metabolismo microbiano de ciertas especies bacterianas para la generación de electrones. Estos electrones, resultado de la oxidación del sustrato, pueden ser transferidos al ánodo mediante diversos mecanismos. Además, se producen protones que crean un potencial positivo en el cátodo, que, junto al potencial negativo del ánodo, generan una diferencia de potencial que resulta en la producción de energía eléctrica (Logan, 2008).

Una variante de esta tecnología, son las celdas de combustible microbianas que utilizan sedimentos como combustible, denominadas también celdas de combustible microbianas bénticas (CCMBs). La energía se puede cosechar de los sedimentos acuáticos, ya sea de ríos, mares o lagunas, enterrando un electrodo en sedimentos y haciendo una conexión eléctrica entre este electrodo y un electrodo similar en el agua aeróbica suprayacente. La recuperación de electricidad de estos sedimentos es análoga a la de las celdas de combustible convencionales. (Lovley, 2006).

Entre las aplicaciones de estos dispositivos, está su utilización como fuentes de energía renovable para operar sensores en ambiente marinos, donde el uso de baterías convencionales se vuelve problemático. Varios sensores pueden ser impulsados con la ayuda de CCMBs, para monitorear, por ejemplo; temperatura, salinidad, patrones de marea, la presencia de algas y otras formas de vida, patrones de migración de peces, contaminación orgánica por la producción del petróleo y compuestos metálicos de otros procesos industriales (Scott et al., 2008). Además de la producción de electricidad, estos dispositivos pueden utilizarse para la biorremediación, es decir, la remoción de contaminantes de suelos y aguas subterráneas por medio de microorganismos (Mora y Bravo, 2017).

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Examinar el desempeño de una celda de combustible microbiana béntica para la producción de bioelectricidad.

### **1.4.2 Objetivos particulares**

- Construir una celda de combustible microbiana béntica empleando electrodos de fibra de carbón y veil.
- Obtener la curva de aclimatación de la celda de combustible microbiana.
- Caracterizar la celda de combustible mediante curvas de polarización y potencia.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. Celdas de combustible microbianas

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) son una tecnología innovadora en el campo de la energía renovable y sostenible que permite abordar la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Se trata de dispositivos que emplean bacterias vivas o microorganismos para transformar la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica debido a la oxidación de materia orgánica en un ambiente anaeróbico, claramente este proceso es posible llevarlo a cabo cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones ( $e^-$ ) producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en vez de a un aceptor natural de electrones, tal como el oxígeno (Figura 2.1). De este modo, es posible señalar que el proceso degrada la materia orgánica (sustrato o combustible), esta tecnología se ha estudiado ampliamente para la generación de energía eléctrica a pequeña escala.

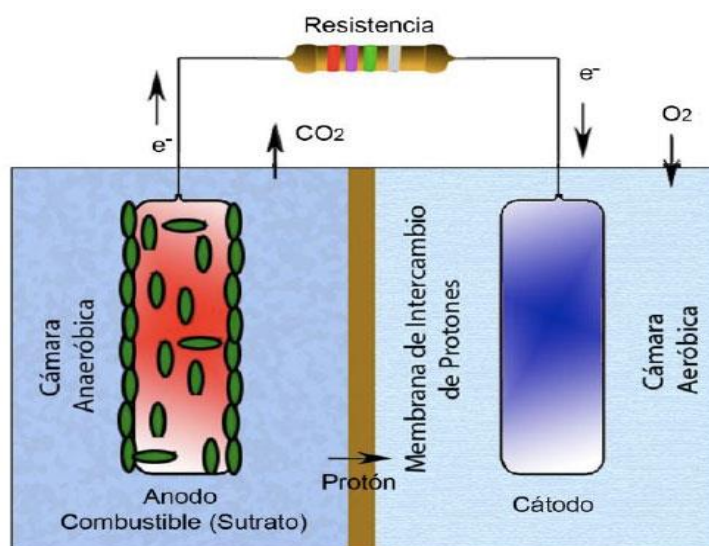


Figura 2.1 Detalles principales de una CCM de cámara doble [Du et al, 2007].

Las celdas de combustible microbianas se han convertido en una novedosa alternativa para la recolección de energía en entornos acuáticos, ya que estas se caracterizan por proporcionar energía constante y por operar sin mantenimiento durante largos periodos de tiempo; lo cual los ha convertido en dispositivos factibles

para sensores submarinos, sistemas de comunicaciones, e incluso para aplicaciones en el área de robótica.

Esta tecnología ofrece una solución atractiva a los desafíos energéticos actuales, ya que hace posible la producción de energía a partir de fuentes renovables y su uso eficiente en sistemas de baja potencia. Además, las CCM son capaces de generar electricidad a partir de residuos orgánicos, lo que las convierte en una solución sostenible para el tratamiento de residuos y la generación de energía.

Los elementos principales que conforman una CCM se describen brevemente a continuación:

- **Ánodo**

Bajo ciertas circunstancias, el elemento que lo forma debe ser conductor, biocompatible y estable. El material más empleado en el electrodo es el carbón, en forma de grafito compacto, tiras o gránulos, como carbono vítreo y materiales de fibra (fieltro, tela, papel, fibra de espuma, entre otros). Otro material que es posible emplear, es el cobre, puesto que es fácil de usar y práctico.

- **Cátodo**

Debido a su poder oxidante, abundancia, disponibilidad, bajo costo, sostenibilidad, a que genera agua como producto final y a que reduce cantidad de desechos químicos, el aceptor de electrones más viable y empleado es el oxígeno, sin embargo, debido a su relativa estabilidad, también es posible utilizar zinc.

- **Membrana**

Este componente evita que los electrones fluyan desde la cámara del ánodo a la cámara del cátodo y hace posible que los protones pasen a través de ella. Existen varios tipos, tales como membrana de intercambio de protones, membrana de ultrafiltración, puente de sal y otros materiales empleados para la filtración.

La membrana más utilizada es de intercambio protónico (MIP), dentro de las cuales, la más común es el Nafion®, ya que muestra una alta permeabilidad a los protones ( $p^+$ ).

- Sustrato

Existen diversos sustratos, tales como; glucosa, acetato, sacarosa, lactosa, almidón y otros compuestos puros, que se utilizan como mezclas complejas para emplear biomasa como método de biorremediación y generar energía.

Los compuestos puros son posibles de degradar de una manera más simple, lo cual puede generar más energía e hidrógeno, mientras que los sustratos complejos requieren de diversas comunidades microbianas electroquímicamente activas (BEA) para su degradación. La elección de las poblaciones microbianas depende del tipo de sustrato que se emplee.

La oxidación microbiana del sustrato y el rendimiento electroquímico de la batería son generalmente proporcionales a la concentración del sustrato, sin embargo, la eficiencia de la CCM puede verse afectada por el pH; el gradiente del pH se genera por acidificación en el compartimiento del ánodo y alcalinización en el compartimiento del cátodo, esto debido a que los protones ( $p^+$ ) se consumen en las reacciones del ánodo y del cátodo (Lovley, 2006).

Un pH ácido se produce cuando la difusión y migración de protones ( $p^+$ ) a través de la MIP avanza lentamente en la cámara del ánodo, lo cual provoca una fuerte disminución de la actividad bacteriana, lo que resulta en una afección en la transferencia de protones ( $p^+$ ) a la cámara del cátodo (Lovley, 2006).

Un pH alcalino se produce cuando el flujo de protones y otros cationes alcalinos (Na, K,  $NH_4$ ,  $Ca_2$  y  $Mg_2$ ) hacia la cámara del cátodo reduce el oxígeno. La disponibilidad de protones ( $p^+$ ) en el cátodo es uno de los factores claves que determinan la eficiencia de la reducción del oxígeno, esto significa que el pH ácido en la cámara del cátodo reduce de manera significativa el rendimiento de una CCM (Lovley, 2006).

- Microorganismos

Son la base de la transferencia de electrones ( $e^-$ ), estudiar sus interacciones, identificarlas y establecer sus roles en el proceso hace posible la mejora del desempeño de estos sistemas.

Los principales factores que afectan la producción de energía son las vías metabólicas, las cuales controlan el flujo de electrones ( $e^-$ ) y protones ( $p^+$ ), la influencia del sustrato y el potencial del ánodo; el alto potencial de este posibilita que las bacterias puedan emplear la cadena respiratoria para llevar a cabo el metabolismo oxidativo y transferir electrones al ánodo, sin embargo, si su potencial disminuye, probablemente los electrones se depositen en otros aceptores (sulfato, nitrato, etc.), lo que generará fermentación (Lovley, 2006).

Sin embargo, aunque las CCM han demostrado ser eficientes en la producción de energía, su aplicación práctica en la escala comercial todavía presenta algunos desafíos. Uno de los principales obstáculos es el desarrollo de tecnologías capaces de aumentar la eficiencia y durabilidad de las celdas, ya que los microorganismos utilizados en la producción de energía son sensibles a las condiciones ambientales.

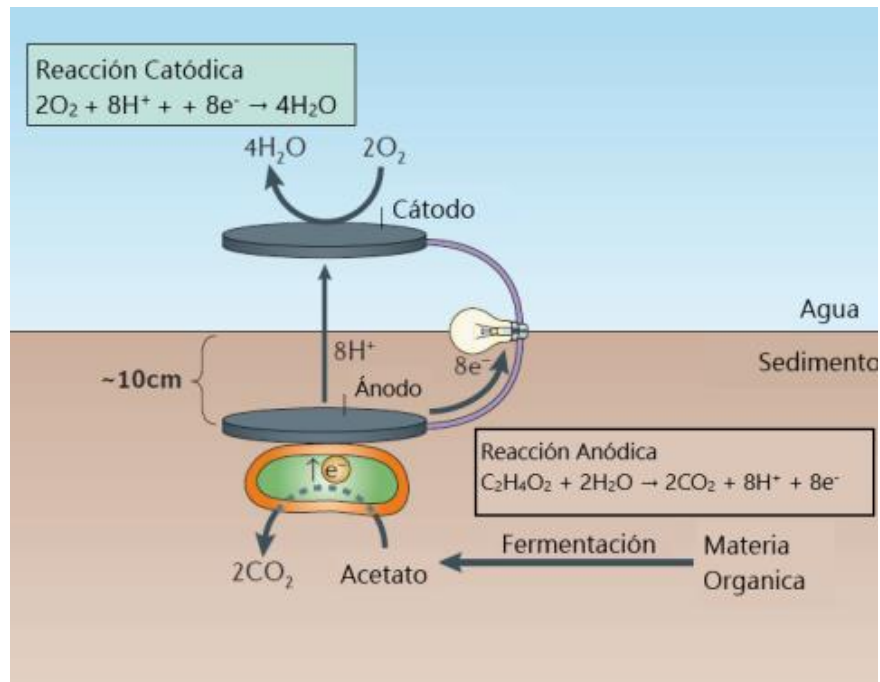
Además, el costo de producción de CCMs todavía es alto en comparación con otras tecnologías de producción de energía renovable. Por lo tanto, es necesario seguir investigando y desarrollando tecnologías más avanzadas y eficientes para lograr la producción asequible y sostenible de energía a partir de CCMs.

## **2.2. Celda de combustible microbiana béntica (CCMB)**

Las celdas de combustible microbianas bénticas emplean microorganismos presentes en el sedimento de los cuerpos de agua para la producción de electricidad a partir de la oxidación de materia orgánica en un ambiente anaeróbico.

Se trata de una CCM con diferentes configuraciones de sistema, en el que el ánodo es depositado en un sedimento anaeróbico, mientras que el cátodo es suspendido en una columna de agua aeróbica o agua en la superficie del ánodo, formando así un cátodo aeróbico.

Una CCMB consta de un ánodo no corrosivo (generalmente grafito) incrustado a poca profundidad en sedimentos acuáticos, y es conectado mediante un circuito eléctrico a un cátodo, el cual es colocado a unos centímetros debajo de la superficie del agua (Figura 2.2).



**Figura 2.2** Detalles principales de una CCMB [Lovley, 2006].

La materia orgánica se encuentra en los sedimentos de muchos ambientes marinos, los cuales generalmente se derivan del asentamiento de fitoplancton muerto y/o detritos (también llamado detritus, resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas), por lo que la materia orgánica contenida en los sedimentos es el alimento de las bacterias anaerobias, y esto puede aprovecharse en la tecnología de las CCMB. En muchos ambientes marinos, los oxidantes son suministrados al sedimento desde el agua suprayacente por difusión, así como por acción del esfuerzo cortante en la interfase sedimento – agua resultante del movimiento del agua suprayacente (Lovley, 2006).

Este tipo de celdas son enfocadas principalmente en dispositivos de biorremediación de materia orgánica en sitios acuáticos y como sistema de alimentación de energía para sensores remotos, lo que hace posible que las CCMB sean empleadas a escala real.

Su principal limitación es la distancia entre el ánodo y el cátodo, debido a que, al disminuir las distancias entre los electrodos, la profundidad del ánodo en el sedimento y la reducción del oxígeno en el cátodo, pueden afectar el potencial de salida de la CCMB. Para minimizar las pérdidas resistivas (óhmicas), se han desarrollado los cátodos flotantes, puesto que incrementan la densidad de potencia y corriente obtenida, ya que mejora la reacción de reducción en el cátodo (Lovley, 2006).

### **2.3. Consideraciones para el diseño de una CCMB**

Algunos de los factores que influyen en el desempeño de una CCMB son (Girguis, 2010):

- **Composición del sedimento:** la presencia de microorganismos que pueden oxidar materias orgánicas es esencial para la producción de energía en una CCMB. La composición del sedimento y la presencia de nutrientes esenciales influyen en la cantidad y calidad de los microorganismos presentes.
- **Ambiente anaeróbico:** las CCMBs requieren un ambiente anaeróbico para su funcionamiento óptimo. La presencia de oxígeno puede afectar de manera negativa el desempeño de la celda y reducir la cantidad de energía generada.
- **Temperatura:** la temperatura del ambiente puede afectar la velocidad de oxidación de la materia orgánica y la tasa de producción de electricidad. La temperatura ideal para el funcionamiento de las CCMBs depende de la especie de microorganismos utilizados.
- **Concentración de materia orgánica:** la cantidad de materia orgánica disponible en el sedimento influye de manera significativa en la tasa de producción de electricidad. Una concentración demasiado baja puede disminuir la eficiencia de la celda, mientras que una concentración demasiado alta puede generar un exceso de residuos orgánicos que pueden afectar negativamente en el ambiente.
- **Diseño de la celda:** el diseño de la CCMB influye en su eficiencia y en la cantidad de energía generada. La elección de materiales, la geometría y las



condiciones de funcionamiento son factores importantes que pueden afectar el desempeño de la celda.

Se considera que estos factores son críticos en el funcionamiento y desempeño de una CCMB, por lo que es importante controlarlos y optimizarlos para garantizar una producción eficiente y sostenible de energía a partir de estas celdas.

#### **2.4. Electrodo catódico**

Uno de los factores limitantes para el rendimiento de una CCM es el cátodo, esto se debe a la pobre cinética de la reacción de reducción de oxígeno a pH neutro en un electrolito líquido.

- *Cátodos de grafito y carbón*

De acuerdo con Gatti (2021), una CCMB implementada en un sedimento marino con platos de grafito como elementos catódicos tuvo una densidad de potencia de 20 mW/m<sup>2</sup> durante 4 meses, y generó un máximo de 28 mW/m<sup>2</sup>.

Al usar cátodos de cepillo de carbón se obtuvo una densidad de potencia de 34 mW/m<sup>2</sup> durante 125 días, mientras que con cátodos acuosos de acero inoxidable se generaron hasta 100mW/m<sup>2</sup> durante 45 días, esto debido a las características de conducción del material (Gatti, 2021).

#### **2.5. Cátodos aireados**

Un cátodo aireado es aquel que emplea el oxígeno fácilmente disponible (oxígeno del ambiente), el cuál es un buen receptor de electrones, sin necesitar de un aireador externo que consuma la corriente eléctrica, estos están compuestos por 3 capas principales (Gatti, 2021):

1. Capa de difusión: permite la reacción de reducción del oxígeno, lo cual mejora las condiciones de evaporación del agua. Así mismo, permite la transferencia de oxígeno y previene la filtración de agua hacia el cátodo, de modo que favorece la transferencia de oxígeno hacia el catalizador, así mismo, le brinda integridad al electrodo para que éste presente un buen rendimiento ante altas presiones hidrostáticas.

2. Catalizador: brinda una mayor velocidad en la reacción de reducción del oxígeno en el cátodo.
3. Colector de corriente: se encarga de aceptar los electrones (e-) provenientes del ánodo.

## 2.6. Electrodo anódicos

El ánodo que es depositado en el sedimento marino se desempeña como soporte y aceptor para las bacterias que se encuentran presentes en el sedimento, lo que a su vez favorece la oxidación de la materia orgánica, generando electrones y protones. La transferencia de electrones extracelular está dada principalmente por la transferencia indirecta de los mismos a través de mediadores y de pilas eléctricamente conductivas (Lovley, 2006).

En la Tabla 2.1 se presentan diferentes materiales que se pueden emplear para electrodos anódicos y sus rendimientos.

**Tabla 2.1** Materiales de electrodos anódicos [González, 2009].

Tipo de celda	Material	Densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )	Electrolito	Inoculo	Volumen (L)	Referencia
CCMB	Filtro de grafito	4.3	Agua residual	Sedimento de lago	30	Xia et al, 2015
CCMB	Filtro de grafito	80	Agua dulce	Sedimento de campos de arroz	*	Noori et al, 2016
CCMB	Fibra de carbón	190	Agua dulce	Sedimentos acuáticos	100	Karra et al, 2013
CCM	Acero inoxidable	500	Agua residual doméstica	Agua residual doméstica	0.125	Su et al, 2013
		304				

\* No reportado.

## **2.7. Microbiología en una CCMB**

Como se ha mencionado con anterioridad, las CCMBs son dispositivos que emplean microorganismos para convertir la materia orgánica en energía eléctrica. Su microbiología es un sistema complejo y dinámico que involucra una comunidad diversa de microorganismos que interactúan entre sí y con los electrodos de la CCMB.

En términos generales, es posible clasificar los microorganismos en las CCMBs en dos grupos: electrogénicos y no electrogénicos. Los microorganismos electrogénicos, como las especies *Geobacter* y *Shewanella*, son capaces de transferir electrones al ánodo de la celda de combustible, generando una corriente eléctrica. Los microorganismos no electrogénicos, como bacterias fermentativas y los metanógenos, descomponen la materia orgánica y generan subproductos metabólicos que pueden ser utilizados por los microorganismos electrogénicos (González, 2009).

El éxito de una CCMB depende de las interacciones entre las diferentes especies microbianas presentes. Por ejemplo, las bacterias electrogénicas pueden depender de bacterias no electrogénicas para producir la materia orgánica que necesitan para generar electricidad.

De manera similar, algunas bacterias electrogénicas pueden consumir oxígeno, creando un ambiente anaeróbico más favorable para el crecimiento de otras bacterias electrogénicas.

La comunidad microbiana en una CCMB se puede manipular para mejorar su rendimiento. Por ejemplo, los investigadores han experimentado con la adición de cepas específicas de bacterias electrogénicas a las CCMB para aumentar la eficiencia de generación de electricidad. Otros investigadores han explorado el uso de consorcios microbianos, o poblaciones mixtas de microorganismos, para mejorar el rendimiento general de las CCMBs (González, 2009).

Para realizar una CCMB es indispensable tomar en cuenta diversos factores, tales como los materiales empleados en la configuración de los electrodos (ánodo y cátodo), así como la temperatura, entre otros mencionados anteriormente en el contenido de la presente tesis. Sin embargo, se han realizado estudios donde se examina la eficacia de los sustratos empleados para mejorar el desempeño de las CCMB en base a este factor (Lovley, 2006).

Dentro de estos estudios se obtuvo que la *quitina* es común encontrarla en sedimentos marinos que, junto con la *queratina* y la *celulosa*, es uno de los compuestos de abono más comunes en ambientes marinos y terrestres.

Rabaey y Lissens (2003) observaron densidades de potencia máximas de 64 a 83mW·m<sup>-2</sup> para la quitina y la celulosa; por lo cual consideraron que el complementar una CCMB con quitina o celulosa hace posible sostener y estimular la producción de energía prolongada. Sin embargo, habría que considerar qué cantidad exacta de quitina o celulosa sería necesaria para lograr esta prolongación de la producción de energía, esto debido a que ambos compuestos pueden ser catabolizados por filotipos (grupo taxonómico definido por el grado de similitud entre secuencias de ADN del gen 16S [Domingo, et. al, 2018]) microbianos de vida libre que no aportan energía en la CCMB.

## **2.8. Adición de nutrientes**

Al ser un dispositivo que utiliza bacterias para convertir materia orgánica en energía eléctrica, la adición de nutrientes es un aspecto importante para la operación de unas CCMB, ya que afecta su rendimiento.

En una CCMB, las bacterias emplean materia orgánica como fuente de alimento y la convierten en electrones y protones. Estos electrones son recolectados como corriente eléctrica. Sin embargo, las bacterias requieren ciertos nutrientes para llevar a cabo este proceso de manera efectiva. Los nutrientes más importantes necesarios para las bacterias en una CCMB son carbono, nitrógeno y fósforo.

El carbono es un nutriente importante necesario para la síntesis de proteínas y el crecimiento celular.

El nitrógeno puede suministrarse a una CCMB en forma de amonio, nitrato o compuestos orgánicos de nitrógeno.

El fósforo también es esencial para el crecimiento y el metabolismo bacteriano. En una CCMB, puede suministrarse en forma de sales de fosfato.

La adición de nutrientes a una CCMB puede mejorar su rendimiento al aumentar la actividad y el crecimiento de las bacterias. Sin embargo, una adición exagerada de nutrientes puede provocar un crecimiento excesivo de las bacterias y la obstrucción del sistema. Por lo tanto, se requiere un control cuidadoso de la adición de nutrientes para lograr un rendimiento óptimo de la CCMB.

Además de los nutrientes mencionados anteriormente, las bacterias de una CCMB también pueden requerir otros nutrientes como vitaminas y oligoelementos para un crecimiento y actividad metabólica óptimos. La falta de estos nutrientes puede limitar el crecimiento y la actividad de las bacterias, lo que puede reducir la producción de energía eléctrica de la CCMB (Lovley, 2006).

El suministro de nutrientes a una CCMB puede realizarse mediante diferentes métodos. Por ejemplo, los nutrientes pueden ser suministrados al medio del cultivo en el que crecen las bacterias, ya sea de forma líquida o sólida. También es posible suministrar nutrientes a través de un electrodo adicional en la CCMB.

La adición de nutrientes a una CCMB puede tener un efecto importante en el rendimiento del dispositivo. En algunos casos, la adición de nutrientes puede aumentar la producción de energía eléctrica en la CCMB. Sin embargo, en otros casos, la adición de nutrientes puede ser contraproducente y puede disminuir el rendimiento de la CCMB. Por lo tanto, es importante optimizar las condiciones de nutrientes para cada tipo de CCM (Lovley, 2006).

Además, es importante considerar el costo y la disponibilidad de nutrientes al diseñar una CCMB a escala comercial. Por ejemplo, algunos nutrientes pueden ser costosos o difíciles de obtener en grandes cantidades, lo que puede afectar la viabilidad económica de una CCMB a gran escala.

En general, la adición de nutrientes es un aspecto importante en la operación de estos dispositivos y puede tener un impacto significativo en su rendimiento. La optimización cuidadosa de las condiciones de nutrientes es esencial para maximizar la producción de energía eléctrica de la CCMB y para su eventual aplicación práctica en la generación de energía renovable.

## **2.9. Desempeño de las CCMs**

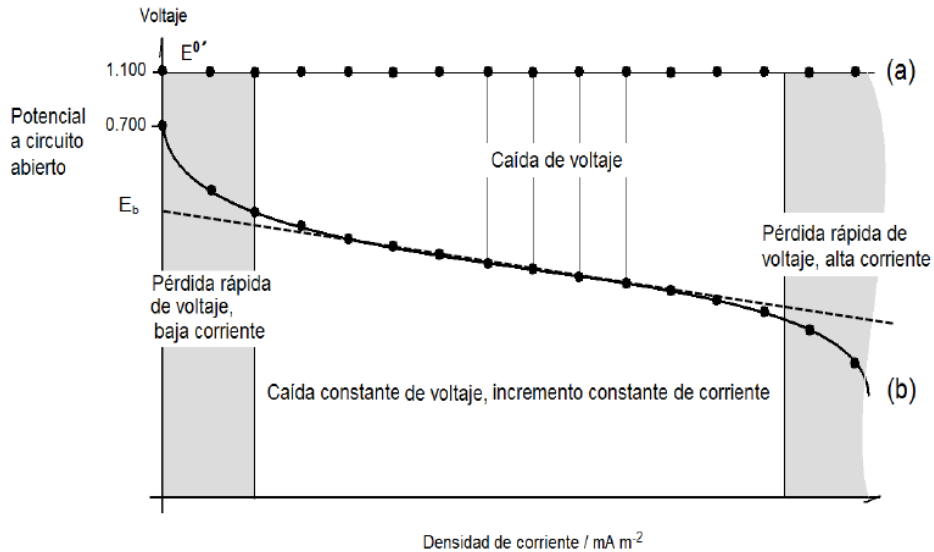
Existen diferentes parámetros para poder evaluar a las CCMs en cuestión de su desempeño entre los cuales se encuentran: la resistencia interna, el voltaje de circuito abierto y la potencia máxima.

Las curvas de polarización son fundamentales ya que con ellas se puede caracterizar como es que la CCM se desempeña, ya que en esta se puede ver el voltaje perdido y si no se pierde voltaje debido a la salida de corriente de una CCM como una función el voltaje en la CCM disponible será mayor.

Si se pierde voltaje en una CCM el desempeño de esta no será óptimo, el desempeño que pueda tener una CCM dependen de las reacciones electroquímicas que puedan suceder en los electrodos.

La curva de polarización (Gráfica 2.1), la cual es una herramienta importante para evaluar el rendimiento de una CCMB, muestra cómo la corriente y el voltaje de la CCMB cambian a medida que se varía la carga externa o la resistencia en el circuito eléctrico de la celda.

Para construir una curva de polarización (Gráfica 2.1), se aplican diferentes cargas a la CCMB y se miden los valores de corriente y voltaje. Estos valores se representan en un gráfico en el que la densidad de corriente se representa en el eje  $y$  y el voltaje en el eje  $x$ . La curva de polarización resultante es una curva que muestra la relación entre la corriente y el voltaje para diferentes cargas externas.



**Gráfica 2.1.** Curva de polarización ideal para una celda de combustible microbiana.

La curva de polarización de una CCMB típicamente tiene una forma similar a la de una celda de combustible convencional. En la región de alta resistencia, la curva muestra una pendiente pronunciada, lo que indica una baja producción de corriente y una alta resistencia interna en la CCMB. A medida que se reduce la resistencia externa, la corriente aumenta y la curva se aplanará. En la región de baja resistencia, la corriente alcanzará un máximo y el voltaje inicial ( $E_0$ ) alcanzará su punto de operación óptimo ( $E_b$ ).

La curva de polarización puede ser empleada para determinar la potencia máxima y la eficiencia de una CCMB. La potencia máxima se alcanza en el punto en que la resistencia externa se ajusta de manera que se maximiza la producción de corriente y se minimiza la pérdida de energía. La eficiencia se calcula como la relación entre la energía eléctrica producida y la energía química consumida.

$$i = (E_{CCMB}/R_{ext}A_{an}) \quad 2.1$$

Donde:

$i$  ( $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,) es la densidad de corriente.

$E_{CCMB}$  (V), es el voltaje obtenido en la celda.

$R_{\text{ext}}$  ( $\Omega$ ), como ya se mencionó es la resistencia externa.

$A_{\text{an}}$  ( $\text{m}^2$ ), es el área proyectada del ánodo en metros cuadrados.

La curva de polarización también puede ser utilizada para evaluar el efecto de diferentes variables en el rendimiento de la CCMB, como la concentración de sustrato, la temperatura y la composición del medio. Esto permite optimizar las condiciones de operación para mejorar la producción de energía eléctrica de la CCMB.

### 2.9.1 Resistencia interna de una CCM

Existe un aspecto que es fácil de notar en la curva de polarización que el rango útil de corriente, que existe una relación lineal que es directa entre los factores de diferencia de potencial producido y la densidad de corriente, lo cual lo puede expresarse como:

$$E_{CCMB} = E_b - IR_{int} \quad 2.2$$

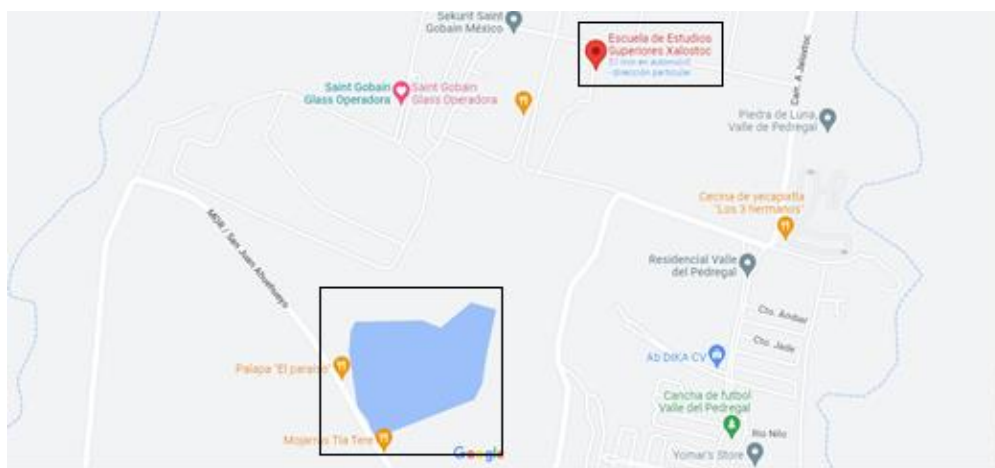
Donde se sabe que  $R_{int}$  es la resistencia interna total existente dentro de la CCM,  $E_b$  es la extrapolación lineal del voltaje a circuito abierto, es decir la extrapolación de lo que es la parte lineal de la curva presente de la polarización. Puede que el valor de  $E_b$  debería ser menor que el voltaje medido a circuito abierto, pero también cercano.



## Capítulo 3. Metodología

### 3.1. Recolección de sedimentos

Los sedimentos fueron recolectados en un jagüey de la localidad de Xalostoc ubicada en el estado de Morelos, México (Figura 3.1 y 3.2). Para llevar a cabo dicha recolección, primero se escarbó a una profundidad de 30 cm aproximadamente, para tomar los sedimentos (posteriores a esos 30 cm de profundidad) colocándolos en un recipiente de PVC (cloruro de polivinilo), los cuales se mantuvieron cerrados hasta su utilización. Los microorganismos contenidos en los sedimentos fueron utilizados como fuente de biocatalizadores para la producción de electricidad en la celda, mientras que la materia orgánica contenida en el lodo sirvió como fuente de carbono para los microorganismos.



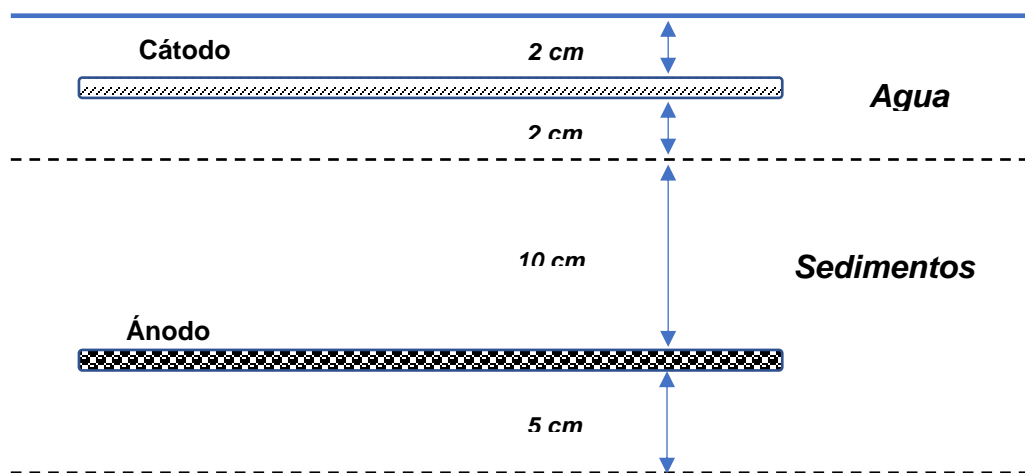
**Figura 3.1** Ubicación del jagüey con respecto a la Universidad (Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc).



**Figura 3.2** Recolección de los sedimentos tomados del jagüey.

### 3.2. Configuración y operación de la CCMB

La celda de combustible microbiana béntica tuvo una configuración tipo estanque. El sistema simuló las interfaces sedimento-superficie acuática de un ambiente natural. El dispositivo consistió en una pecera de vidrio con un volumen total de  $0.014 \text{ m}^3$  (18.5 cm de ancho, 28 cm de largo por 28 cm de alto). Para el ánodo se empleó un electrodo de fibra de carbón, mientras que para el cátodo se utilizó carbón Veil (Fibre Glast Developments Corporation), ambos electrodos tuvieron un área de  $0.09 \text{ m}^2$ . Para la conexión al exterior se empleó alambre de cobre barnizado. La Figura 3.3 muestra un esquema del montaje de la celda.



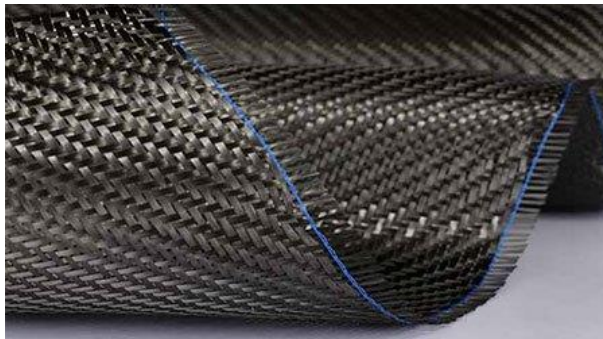
**Figura 3.3.** Esquema de las interfases sedimento-agua en la CCMB.

En la CCMB se incluyeron dos segmentos; sedimentos acuosos y agua. En el dispositivo se colocó una capa de sedimentos de 5 cm y enseguida el ánodo, sobre éste se colocó una capa más de sedimentos de 10 cm, esto con el objetivo de mantener el ánodo bajo condiciones anaerobias, además de servir como separador natural entre las fases del sistema. El cátodo se colocó paralelo al ánodo a una distancia aproximada de 12 cm, quedando suspendido en el agua mediante un sujetador de plástico a la pecera. Finalmente, el cátodo se cubrió con una última capa de agua. El aire se suministró al cátodo por difusión natural a la superficie del agua. Todos los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente.

### **3.3. Electroodos**

#### **3.3.1. Ánodo**

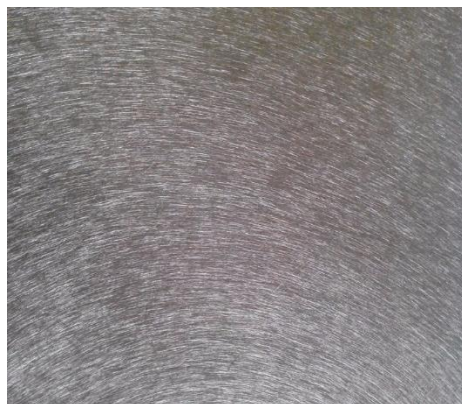
Para el ánodo se empleó la fibra de carbón de la marca Fibreglast (Figura 3.4). Para la conexión exterior se empleó alambre de cobre barnizado. El ánodo constaba de una longitud de 30 cm y un ancho de 15 cm, teniendo un área total de 450 cm<sup>2</sup>, como se utilizaron ambas caras del electrodo el área total fue de 900 cm<sup>2</sup> (0.09 m<sup>2</sup>).



**Figura 3.4** Fibra de carbón.

#### **3.3.2. Cátodo**

Para el cátodo se empleó fibra de carbón Veil de la marca Fibreglast (Figura 3.5). Para la conexión exterior se empleó alambre de cobre barnizado. El cátodo constaba de una longitud de 30 cm y un ancho de 15 cm, teniendo un área total de 900 cm<sup>2</sup> (0.09 m<sup>2</sup>).



**Figura 3.5** Fibra de carbón Veil.

### **3.4. Ensamble de la celda**

Para la fibra de carbón convencional y la fibra de carbón Veil se utilizó tela de algodón (bies) para realizarles una costura alrededor, con el propósito de que éstas no se maltrataran al utilizarlas en la CCMB y tuvieran un correcto desempeño al usarlas como electrodos (véase la Figura 3.6).



**Figura 3.6** Fibra de carbón convencional (izquierda) y fibra de carbón Veil (derecha) con tela de algodón cosida alrededor.

Para el montaje de la celda se realizó una limpieza de la pecera empleada como reactor experimental (Figura 3.7). Se tomaron los sedimentos extraídos del jagüey y se colocaron  $3,920 \text{ cm}^3$  dentro de la pecera, es decir, tomando las medidas de la base de la pecera por 5 cm de alto; después se colocó la fibra de carbón convencional (ánodo) (Figura 3.8) y se añadieron  $6,272 \text{ cm}^3$  más de sedimentos, es decir, tomando las medidas de la base de la pecera por 10 cm de alto; una parte del

restante de la altura de la pecera (10 cm) se llenaron con agua, sin embargo, a la mitad de esta altura se situó la fibra de carbón Veil (cátodo), la cual fue suspendida mediante alambre de cobre barnizado, el cual estaba sujeto a la pecera (Figura 3.9). El aire se suministró al cátodo por difusión natural a la superficie del agua.



**Figura 3.7** Limpieza de la pecera.



**Figura 3.8** Montaje de los sedimentos y colocación del ánodo de la celda.



**Figura 3.9** Ensamble del cátodo y llenado con agua.

Es importante mencionar que las fibras de carbón fueron conectadas a alambre de cobre barnizado, para que éste fungiera como conductor, y de este modo poder realizar las mediciones correspondientes. En la Figura 3.10 puede observarse la CCMB terminada.



**Figura 3.10** Montaje final de la CCMB.

La CCMB se conectó a un multímetro para monitorear el voltaje durante el tiempo de aclimatación del sistema. La celda operó a temperatura ambiente.

### 3.5. Aclimatación de la CCMB (Start-up)

La CCMB se mantuvo en operación durante un período de 30 días, usando la materia orgánica contenida en los sedimentos. Durante el tiempo de colonización bacteriana, se monitoreo el voltaje a circuito abierto (VCA) en el sistema, empleando para ello un multímetro (Multímetro profesional de lujo con interfase para PC “Steren”, Modelo: MUL-600), una vez que la celda alcanzó un voltaje estable se estudió el desempeño de la celda.

### 3.6. Adquisición de datos y análisis electroquímicos

Una vez que la celda alcanzó un voltaje estable se estudió el desempeño de la celda. En este trabajo se utilizó el método de curva de polarización para evaluar el desempeño electroquímico de la celda, para lo cual se empleó una resistencia externa ( $R_{ext}$ ), variándola en un intervalo de 500  $\Omega$  a 10 k $\Omega$  y registrando el Voltaje ( $E_{CCMB}$ ) correspondiente obtenido en la celda. Para cada par de valores ( $\Omega$ -V) obtenidos experimentalmente, se calculó la corriente de acuerdo con la ley de ohm:

$$I = \frac{E_{CCMB}}{R_{ext}} \quad 3.1$$

La curva de polarización se obtuvo graficando el voltaje de la celda vs la corriente. Otro método utilizado para evaluar el desempeño de la CCMB es el máximo pico de potencia (MPP), el cual se obtiene a partir de una curva de polarización, graficando la densidad de potencia vs la densidad de corriente, tomando en cuenta que la potencia de la celda ( $P_{CCMB}$ ) se define como:

$$P_{CCMB} = \frac{E^2_{CCMB}}{R_{ext}} \quad 3.2$$

La densidad de potencia obtenida en este estudio se normalizó al área del ánodo ( $mWm^{-2}$ ).

### 3.7 Determinación de la resistencia interna del sistema

El aspecto más notable de la curva de polarización muestra que en el rango útil de corriente, hay una relación lineal directa entre el voltaje producido y la densidad de corriente (región intermedia de la Figura 2.1), la cual puede ser expresada como:

$$E_{CCMB} = E_b - IR_{Int} \quad 3.3$$

Donde:

$R_{Int}$  es la resistencia interna total de una CCMB, la cual puede ser fácilmente obtenida de la pendiente de la línea curva (b).

$E_b$  es la intersección de la curva lineal con el eje del voltaje (E), que es referido como la extrapolación lineal del voltaje a circuito abierto, esto es la extrapolación de la parte lineal de la curva de polarización (Véase la Figura 2.1)

La resistencia calculada usando este método se conoce como resistencia interna en lugar de resistencia óhmica porque las pérdidas de activación y concentración afectan la pendiente de la curva de polarización, y la influencia ha sido considerada en el cálculo de la resistencia interna usando este método (Fan et al., 2008).

## Capítulo 4. Resultados y discusión

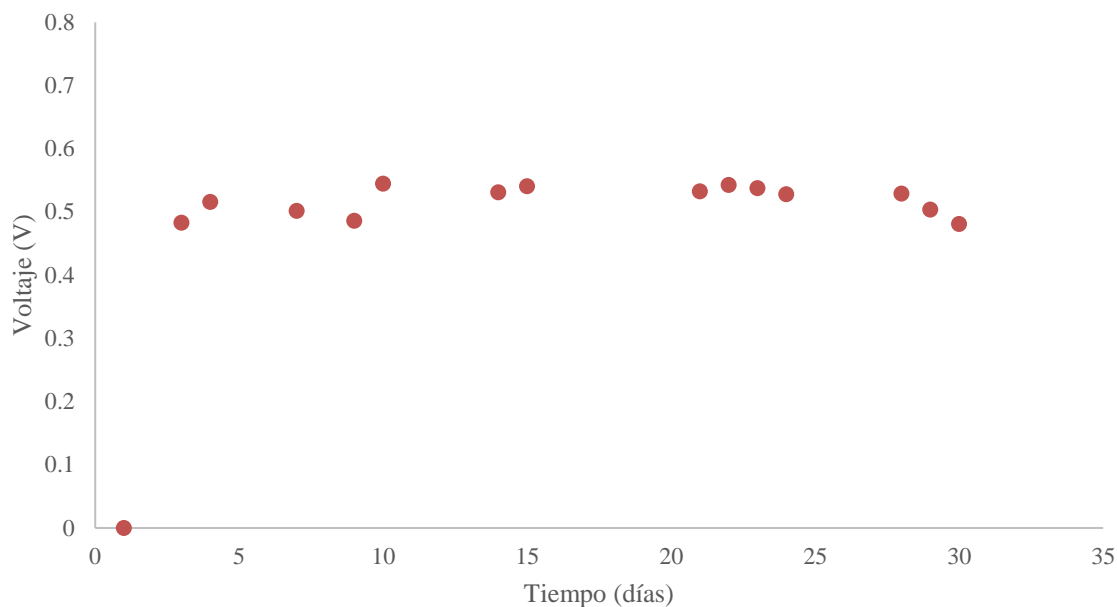
### 4.1. Aclimatación de la CCMB

La celda béntica se puso en marcha, empleando sedimentos provenientes de un jagüey de Xalostoc, en el municipio de Ayala, Morelos. En esta etapa se permitió la colonización del ánodo por los microorganismos contenidos en los sedimentos. La gráfica 4.1 muestra el tiempo de colonización bacteriana en función del voltaje (monitoreado a circuito abierto), tomando los datos de la Tabla 4.1.



Tabla 4.1 Bitácora de comportamiento de la CCMB.

Día	Fecha	Hora	Medición (mV)	Media (mV)	Temperatura (°C)	Media (°C)
1	03/05/2022	12:52	1000	1000	25	25
2	04/05/2022					
3	05/05/2022	13:43	483	483	26	25
		17:00	483		24	
4	06/05/2022	12:00	513	516.5	24	24.5
		16:20	520		25	
5	07/05/2022					
6	08/05/2022					
7	09/05/2022	12:50	502	502	26	26
8	10/05/2022					
9	11/05/2022	15:20	512	486.5	25.6	27.15
		18:43	461		28.7	
10	12/05/2022	11:36	601	545	26.4	29.6
		18:40	489		32.8	
11	13/05/2022					
12	14/05/2022					
13	15/05/2022					
14	16/05/2022	11:49	531	531	25.2	25.2
15	17/05/2022	12:59	536	541	26	25
		13:21	544		25	
		18:37	543		24	
16	18/05/2022					
17	19/05/2022					
18	20/05/2022					
19	21/05/2022					
20	22/05/2022					
21	23/05/2022	13:11	534	533	26	26.5
		18:06	532		27	
22	24/05/2022	13:00	545	543.5	28.5	26.55
23	25/05/2022	15:08	542	538.5	24.6	25.5
		17:58	535		26.4	
24	26/05/2022	14:23	528	528	24.5	24.5
25	27/05/2022					
26	28/05/2022					
27	29/05/2022					
28	30/05/2022	16:30	529	529	26	26
29	31/05/2022	12:39	504	504	25	25
30	01/06/2022	13:13	459	481.5	26	26
		17:00	504		26	



**Gráfica 4.1.** Tiempo de aclimatación de la CCMB

En la Gráfica 4.1 se muestra la sistematización de las medidas tomadas durante 30 días, es importante resaltar que la obtención de estos datos se hizo sacando la media de las mediciones tomadas por día, como se observa en la Tabla 4.1.

La CCMB se puso en marcha, empleando los sedimentos y agua provenientes del jagüey. En esta etapa se llevó a cabo la colonización del ánodo por los microorganismos contenidos en los sedimentos. En la Gráfica 4.1 se muestra el tiempo de colonización bacteriana en función del voltaje (monitoreado a circuito abierto).

Lo anterior indica que, aproximadamente en 15 días la celda alcanza un voltaje estable, además, la cantidad de materia orgánica contenida de forma natural en los sedimentos es suficiente para permitir que la CCMB permanezca en operación de manera continua por un periodo de tiempo superior a 15 días.

Cabe mencionar que la celda continuó en operación sin necesidad de suministrarle materia orgánica adicional, únicamente se le suministraba agua, ya que, debido al clima, ésta se evaporaba.

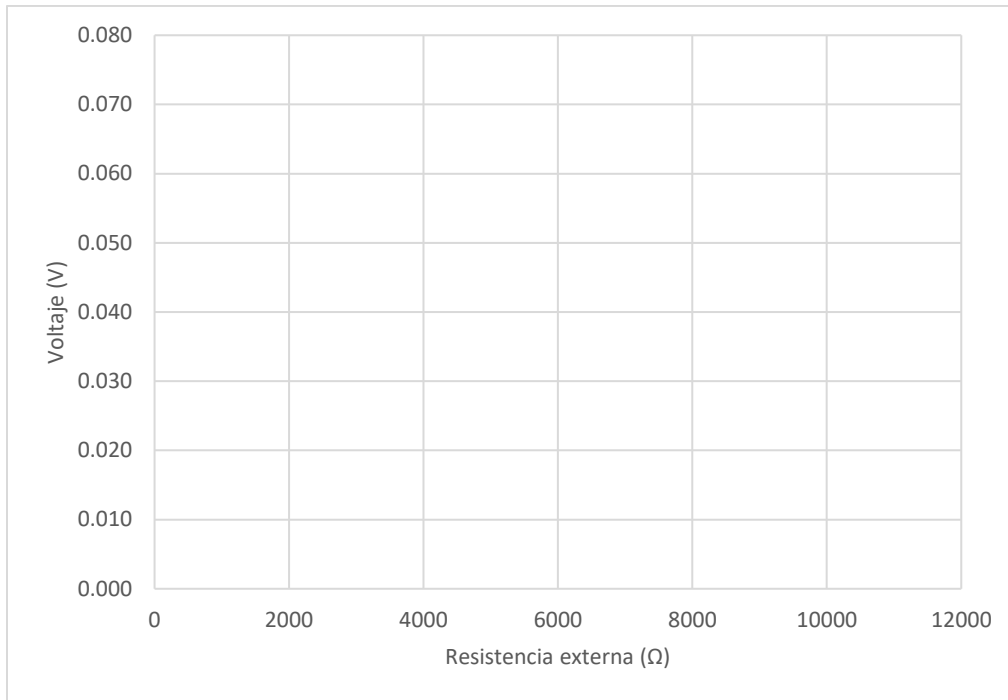
Tal como es posible observar en la Gráfica 4.1, la celda alcanzó un VCA (voltaje de circuito abierto) de 0.402 V, incrementándose ligeramente hasta los 10 días de operación y manteniéndose estable durante los siguientes 20 días en un voltaje de ~0.500 V, lo cual sugirió que el ánodo había sido colonizado.

En ambientes acuáticos naturales, están presentes diferentes tipos de comunidades microbianas, éstas cooperan en la degradación de materia orgánica, siendo los microorganismos fermentativos los encargados de romper inicialmente la materia orgánica compleja en acetato y otros compuestos, que otras especies de bacterias pueden oxidar a dióxido de carbono (Lovley 2006). En este estudio no se examinó el consorcio que colonizó el ánodo de la CCMB, sin embargo, en aguas dulces, es probable la presencia de especies *Geobacter* en los sedimentos utilizados.

#### **4.2. Voltaje como una función de la resistencia externa**

Una vez que la CCMB alcanzó un voltaje estable en el periodo de aclimatación, que como puede observarse en la Gráfica 4.1 sucedió a los 15 días de operación, se realizó la adquisición y sistematización de datos para la caracterización del sistema.

El VCC (Voltaje de Circuito Cerrado) medio en el período de aclimatación, se alcanzó bajo la condición de una resistencia muy alta (10k $\Omega$ ). Cuando la resistencia se reduce, el voltaje disminuye, así el voltaje de la celda (*ECCMB*) es una función de la carga ( $\Omega$ ). Para estudiar la celda, se varió la resistencia externa en un intervalo de 250 a 10,000  $\Omega$ , el voltaje registrado para cada *R<sub>ext</sub>* se muestra en la Gráfica 4.2.



**Gráfica 4.2.** Voltaje de la CCMB en función de la resistencia.

Para evaluar el desempeño de la celda báltica, se eligieron los procedimientos de curvas de polarización y MPP (máximo pico de potencia). En los siguientes apartados, se examinan los resultados obtenidos en cada caso.

### 4.3. Curva de polarización

En base a los datos de la Gráfica 4.2, es posible generar la curva de polarización correspondiente. La Gráfica 4.3 muestra el voltaje en función de la corriente de la CCMB, expresada como densidad de corriente ( $i$ ).

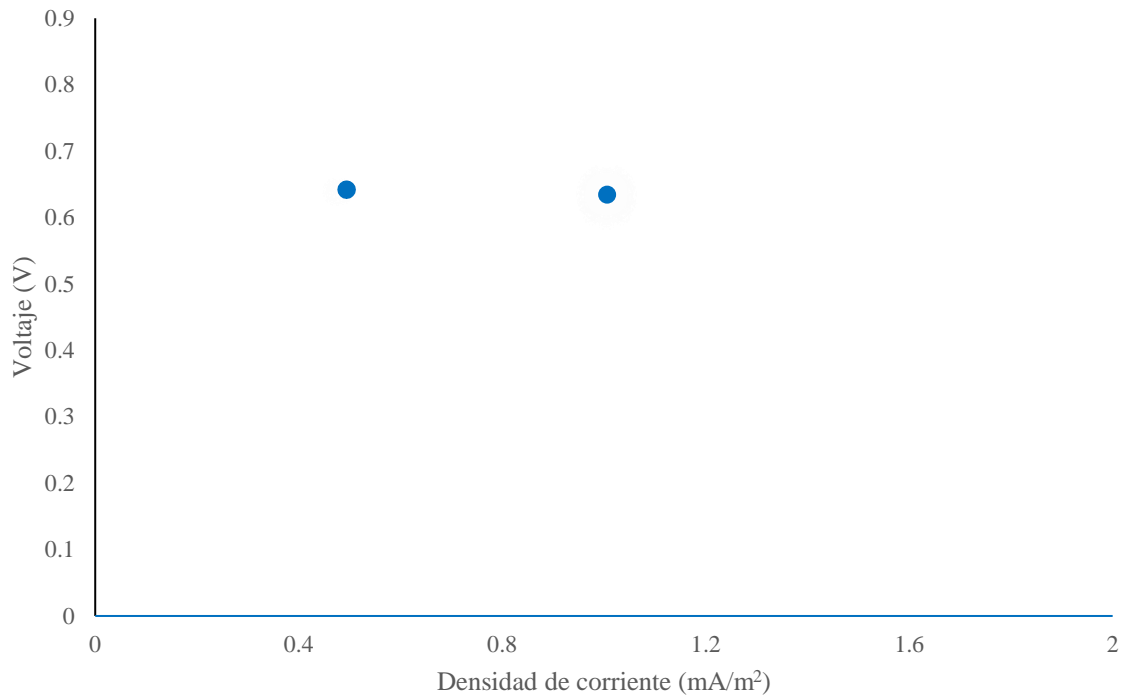
$$i = \frac{E_{CCMB}}{R_{ext}A_{an}}$$

Donde:

$E_{CCMB}$  (V), es el voltaje obtenido en la celda.

$R_{ext}$  ( $\Omega$ ), es la resistencia externa.

$A_{an}$  ( $m^2$ ), es el área proyectada del ánodo en metros cuadrados.



**Gráfica 4.3.** Voltaje de la CCMB expresado en función de la corriente.

La curva de polarización obtenida en la CCMB se muestra en la Gráfica 4.3. Se puede observar que la celda alcanzó un voltaje a circuito abierto de 0.845 V, decayendo ligeramente en un intervalo de 0.6 y 0.7 V, y disminuyendo casi linealmente en potenciales menores a 0.5 V, lo cual es evidencia de la existencia de pérdidas óhmicas. Estas pérdidas son las más importantes en el diseño de una celda de combustible microbiana béntica, ya que es esta región de la curva donde se ubica la máxima producción de potencia que alcanza una CCMB. Las pérdidas óhmicas pueden minimizarse reduciendo la distancia entre los electrodos, incrementando la conductividad de la solución y capacidad de buffer y asegurando un buen contacto entre el circuito y los electrodos (Logan, 2008).

Se aprecia que los últimos tres valores de voltaje (0.333, 0.135 y 0.072) como función de la densidad de corriente, disminuyen de manera lenta, no así los siguientes, los cuales decrecen sus valores de forma constante y casi lineal, estas caídas de voltaje pueden atribuirse a las pérdidas óhmicas del sistema. Dichas pérdidas son de suma importancia en el diseño de una CCMB, puesto que en esta

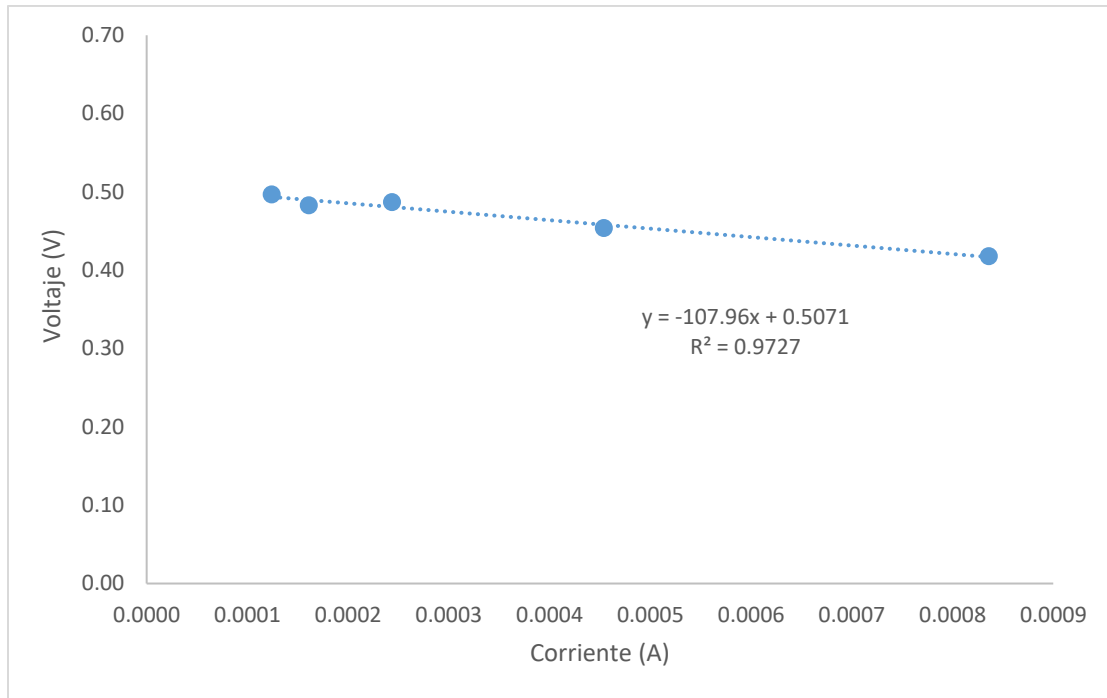
región de la curva se sitúa la máxima producción de potencia que alcanza una CCMB.

Existen dos tipos de transferencia de carga que incrementan las pérdidas óhmicas: la transferencia de electrones a través de los electrodos y la transferencia de iones por medio del electrolito. Estas pérdidas pueden minimizarse al reducir la distancia entre los electrodos, de manera que la conductividad se incrementa y se asegura un buen contacto entre el circuito y los electrodos. Finalmente, en la Gráfica 4.3 se observa que la caída más precipitada de voltaje ocurre ante densidades de corriente más altas, y se atribuye a pérdidas por transporte de masa.

#### **4.4 Cálculo de la resistencia interna**

La curva de polarización idealizada presenta tres regiones, siendo la parte intermedia la región más importante para la operación de una celda de combustible microbiana, donde el voltaje disminuye casi linealmente con respecto a la corriente.

Así, para analizar la resistencia interna ( $R_{int}$ ) de la celda béntica, se seleccionaron los puntos centrales de la curva de polarización (Gráfica 4.3), considerando los datos desde 0.568 V con una densidad de corriente de 1.051 mA/m<sup>2</sup> y hasta 0.333 V con una densidad de corriente de 1.233 mA/m<sup>2</sup>, los cuales se muestran en la Gráfica 4.4. De la pendiente de la recta obtenida mediante el modelo matemático asociado a los puntos, se puede relacionar con la resistencia interna  $R_{int}$ .



**Gráfica 4.4** Resistencia interna de la CCMB.

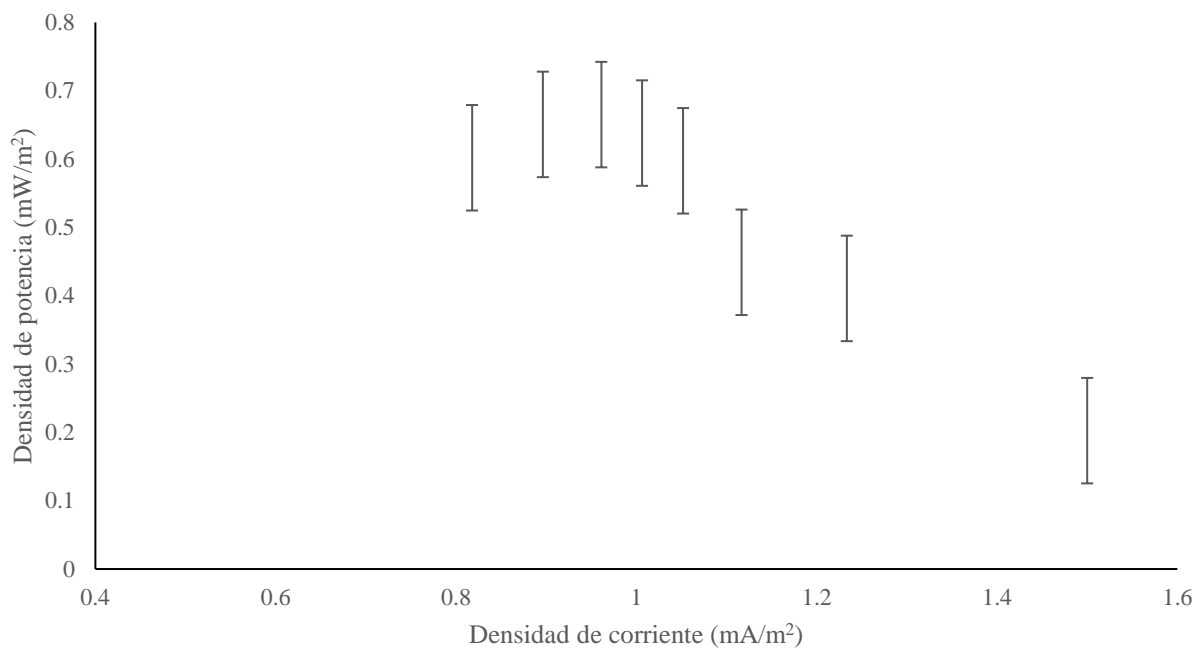
Considerando lo anterior, se podría decir que el valor de la resistencia interna de la CCMB fue de 107.96  $\Omega$ , el cual es relativamente bajo, comparado a los resultados obtenidos con otros estudios. Dávalos, 2019 reportó una resistencia interna de 3413  $\Omega$ , en una celda béntica donde añadieron quitina natural como materia orgánica adicional. Por otra parte, González, 2019, examinó el efecto de diferentes distancias entre los electrodos, obteniendo una menor resistencia interna a menores distancias, con valores que oscilaron entre 54 y 122  $\Omega$ .

#### **4.5 Densidad de potencia producida por la CCMB**

A partir de una curva de polarización se puede obtener la curva de densidad de potencia, graficando la densidad de corriente vs densidad de potencia. La producción de potencia de la celda béntica, se normalizó al área del ánodo (0.045  $m^2$ ). La densidad de potencia ( $P_{\text{ánodo}}$ ) de una CCMB se expresa mediante la ecuación

$$P_{\text{ÁNODO}} = E^2_{\text{CCMB}} / A_{\text{an}} R_{\text{ext}} \quad (3.4)$$

En la Gráfica 4.5 se muestra la densidad de potencia obtenida en la celda como una función de la densidad de corriente. Se puede observar que se obtiene un máximo pico de potencia de  $0.67 \text{ mW/m}^2$  con una densidad de corriente de  $0.96 \text{ mA/m}^2$ , lo cual muestra que es factible utilizar sedimentos de un jagüey para la producción de energía limpia con un dispositivo de celda de combustible microbiana béntica.



**Gráfica 4.5** Densidad de potencia de la CCMB.

En otro estudio (Gatti 2016), utilizó sedimentos de río en una celda de dos compartimientos empleando electrodos de grafito, obteniendo una densidad de potencia de  $3.57 \text{ mW/m}^2$  con una densidad de corriente de  $20 \text{ mA/m}^2$ . Por otra parte (Dávalos 2019), obtuvo una máxima densidad de potencia de  $2.64 \text{ mW/m}^2$  con una densidad de corriente de  $5.29 \text{ mA/m}^2$ , en una celda de combustible béntica utilizando sedimentos de un río. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que es factible utilizar sedimentos de un jagüey para la producción de electricidad.



## Capítulo 5. Conclusiones

Se examinó el desempeño de una celda de combustible microbiana béntica para la producción de bioelectricidad, la cual se construyó empleando sedimentos de un jagüey en un dispositivo de celda de combustible microbiana béntica tipo estanque, aprovechando la materia orgánica y los microorganismos contenidos en estos sedimentos para la producción de electricidad.

Específicamente, se utilizaron electrodos de fibra de carbón y fibra veil, lo cual permitió analizar la viabilidad de estos materiales, se concluye que son adecuados en comparación con otras investigaciones.

Se obtuvo la curva de aclimatación de la CCMB, mostrando que el ánodo había sido colonizado durante los primeros 3 días de operación de la CCMB, donde se alcanzó un voltaje de 0.402 V incrementándose ligeramente hasta los 10 días de operación, y manteniéndose estable en los siguientes 20 días en un voltaje de ~0.500 V.

La CCMB fue caracterizada mediante curvas de polarización y potencia. En la curva de polarización se observó que la celda alcanzó un voltaje de circuito abierto de 0.845 V, decayendo ligeramente en un intervalo de 0.600 y 0.700 V, y disminuyendo casi de manera lineal en potenciales menores a 0.500 V, lo cual permite evidenciar la existencia de pérdidas óhmicas. La curva de la densidad de potencia obtenida en la celda como una función de la densidad de corriente mostró la obtención de un máximo pico de potencia de 0.67 mW/m<sup>2</sup> con una densidad de corriente de 0.96 mA/m<sup>2</sup>, demostrando así que es factible emplear sedimentos de un jagüey para la producción de energía limpia como un dispositivo de celda de combustible microbiana béntica.

Una CCMB es una forma de producción de energía eléctrica eficiente, puesto que no requiere de un combustible para funcionar, sino simplemente la liberación de energía química, lo cual conlleva la liberación e interacción de electrones. En el presente trabajo, se elaboró una configuración de placas paralelas, la cual funcionó eficientemente, sin embargo, es posible conectar varias celdas en serie para obtener una generación de energía mayor y poder llevarla a una aplicación más

grande, tal como dispositivos electrónicos. Se comprueba la obtención de una energía limpia, renovable y sustentable, que únicamente depende del recurso del agua, la cual puede ser obtenida de aguas grises o residuales, sin necesidad de liberar contaminantes, lo cual impacta positivamente al medio ambiente y al desarrollo de tecnologías limpias para un mundo mejor.

## **Capítulo 6. Recomendaciones para futuros trabajos.**

En este trabajo se planteó la propuesta de usar sedimentos provenientes de un jagüey en una celda de combustible microbiana béntica para la producción de electricidad, sin embargo, la producción de potencia del dispositivo aun es baja, así que para futuros trabajos se buscará incrementarla. Es importante monitorear el desempeño del sistema por un mayor período de tiempo para examinar el tiempo de operación de la celda con la materia orgánica contenida en los sedimentos, ya que esta investigación se llevó a cabo a escala de laboratorio.

## Capítulo 7. Referencias.

- [1] Andrade, H., J., Artega, C., C., Segura, M., A. (2017). Emisión De Gases De Efecto Invernadero Por Uso De Combustibles fósiles En Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 18 (1), 103-112. DOI: [http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num1\\_art:561](http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561)
- [2] Buitrón G., Moreno-Andrade I., Moreno G., "Effects of starvation on the cellular fatty acid methyl esters profile of pseudomas aeruginosa ATCC 10145", 20(1a), pp. 213-214.
- [3] Buitrón, G. and Pérez, J., 2011. "Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos". *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 14(1), pp. 05-11.
- [4] Castro J. y Cerda E., 2012. "Las energías renovables en el ámbito internacional". *Cuadernos económicos de ICE*, 83, pp. 11-36.
- [5] Castro J., 2011. "Perspectivas de la demanda energética global", *Petrotecnia*, único, pp. 54-70.
- [6] Chu S., Majudmar A., 2012. "Opportunities and challenges for a sustainable energy future". *Nature*, 16;488(7411), pp. 294-303.
- [7] Domingo, J., Sánchez, C., 2018. "De la flora intestinal al microbioma", *Revista Española de Enfermedades Digestivas*, 111(1).
- [8] Du, Z., H. Li y T. Gu, *A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy*, *Biotechnology Advances*: 25 (5), 464-482 (2007).
- [9] *Estadísticas de consumo energético mundial*. (s/f). Enerdata.net.  
Recuperado el 14 de agosto de 2023, de <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- [10] Estrada Gasca, C. A., 2013. Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), pp. 75-84.

- [11] Ferrari, L. 2013. Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas. *Revista Mexicana de Física*, 59 (2), 36-43.
- [12] Gatti, M. N., Quiñones, F. & Milocco, R. H.. (s. f.). ESTUDIO DE DIFERENTES CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE EFLUENTES LÍQUIDOS. researchgate.net. Recuperado 25 de febrero de 2021.
- [13] Girguis, P.,R., Nielsen, M., E., Reimers, C., E. (2010). Fundamentals of Benthic Microbial Fuel Cells: Theory, Development, and Applications In Bioelectrochemical Systems. First edition. Springer Verlag Press.
- [14] Girguis, P.R., M.E. Nielsen, C.E. Reimers. (2010). Fundamentals of Benthic Microbial Fuel Cells: Theory, Development, and Applications. In Bioelectrochemical Systems. First edition. Springer Verlag Press.
- [15] Gonzáles Santoló, J., 2009. "La generación eléctrica a partir de combustibles fósiles". Divulgación, pp.143-151.
- [16] Gonzáles Santoló, J., 2009. "La generación eléctrica a partir de combustibles fósiles". Divulgación, pp.143-151.
- [17] Guzmán, J., J., Cookea, K., G., Gaya, M., O., Radachowskya, S., E., Girguisb, P., R., Chiu, M., A. (2010). Benthic Microbial Fuel Cells: Long-Term Power Sources for Wireless Marine Sensor Networks. Published in Proceedings: SPIE Defense, Security, and Sensing, 1-12
- [18] Guzmán, J., Keegan, G., Gady, M., Sage, E., Girgius, R., Chiu, M. (2010). Benthic Microbial Fuel Cells: Long-Term Power Sources for Wireless Marina Sensors Networks. In SPIE Defense, Security, and Sensing.
- [19] Guzmán, M., A., D., L., A. (2018). Jagüeyes, patrimonio morelense para la sustentabilidad. *Inventio*, la génesis de la cultura universitaria en Morelos, 29-37.
- [20] IEA (2022), World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022?language=es>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).

- [21] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2000.
- [22] International Energy Agency (IEA), 2006.
- [23] Joiner, K., L., Tukeman, G., L., Obratzsova, A., Y., Arias, Y., M. (2020). Impact of sediment parameters in the prediction of benthic microbial fuel cell performance. *The Royal Society of Chemistry*, 10, 26220–26228. <https://doi.org/10.1039/d0ra03459b>
- [24] Karra, U., Huang, G., Umaz, R., Tenaglier, C., Wang, L. and Li, B., 2013. "Stability characterization and modeling of robust distributed benthic microbial fuel cell (DBMFC) system", *Bioresource Technology*, 144, pp. 477-484.
- [25] Lara C., M., 2007. "Escenario energético mundial", *DYNA*, 82(9), pp. 471-478.
- [26] Logan, B., E. (2008). *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons Inc. New Jersey, USA.
- [27] Lovley D., R., "Bug juice: harvesting electricity with microorganism", *Reviews*, 2006.
- [28] Lovley, D., R. (2006). Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nature reviews microbiology*, 4, 497-508.
- [29] Mark, E., Clare, E., Hilmar, A. (2007). Enhanced Power from Chambered Benthic Microbial Fuel Cells. In *Environ. Sci. Technol.* 2007, 41, 7895 – 7900.
- [30] Mora, A. y Bravo, E. (2017). Evaluation of the Electrogenic potential of coastal sediments of la Azufrada beach, Gorgona Island. *Revista de ciencias*, 21 (1).
- [31] Noori, M., Ghangrekar, M. and Mukherjee, C., 2016. "V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> microflower decorated cathode for enhancing power generation in air-cathode microbial fuel cell treating fish market wastewater", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(5), pp. 3638-3645.

- [32] Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S. D. and Verstraete, W., 2003. "A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency", *Biotechnology Letters*, 25(18), pp. 1531-1535.
- [33] Reimers, C., E., Wolf, M., Alleau, Y., Cheng, L. (2022). Benthic microbial fuel cell systems for marine applications. *Journal of power sources*, 522, 1-8.
- [34] Ryckelynck, N., Stecher, H., A., Reimers, C., E. (2005). Understanding the anodic mechanism of a seafloor fuel cell: interactions between geochemistry and microbial activity. *Biogeochemistry*, 76, 113-139.
- [35] Scott, K., Cotlarciuc, I., Lakerman, J., B., Browning, D. (2008). Power from marine sediment fuel cells: the influence of anode material. *Journal of Applied Electrochemistry*, <https://doi.org/10.1007/s10800-008-9561-z>
- [36] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA (2017). Diseño y construcción de jagueyes., Segunda Edición, México. [https://0201.nccdn.net/1\\_2/000/000/170/8fa/Dise--o-y-Construcci--n-de-Jagueyes.pdf](https://0201.nccdn.net/1_2/000/000/170/8fa/Dise--o-y-Construcci--n-de-Jagueyes.pdf) Fecha de consulta: 30 de octubre 2022.
- [37] Su M.; Jiang Y.; Li D., 2013. "Production of acetate from carbon dioxide in bioelectrochemical systems based on autotrophic mixed culture", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(8), pp. 1140-1146.
- [38] *Tendencias Energéticas Mundiales*. (s/f). Enerdata. Recuperado el 14 de agosto de 2023, de <https://es.enerdata.net/publicaciones/informes-energeticos/tendencias-energeticas-mundiales.html>
- [39] Tremblay, Zhang, L., Zhu, X., Kashima, H., Li, J., Ye, D.-d., Liao, Q., & Regan, J. M. (2015). Anolyte recirculation effects in buffered and unbuffered single-chamber air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 179, pp. 26 - 34.
- [40] Wall, J., D., Harwood, C., S., Demain, A. (2008). *Bioenergy*, ASM Press, Washington, DC.

- [41] Xia, C., Xu, M., Liu, J., Guo, J. and Yang, Y., 2015. "Sediment microbial fuel cell prefers to degrade organic chemicals with higher polarity", *Bioresource Technology*, 190, pp. 420-423.
- [42] Zelaya A., "El conflicto energético mundial. Análisis y perspectivas", *Instituto de Educación Media Dr. Arturo Oñativia, Universidad Nacional de Salta*, 2006.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



Asunto: Voto Aprobatorio

DR. GREGORIO BAHENA DELGADO  
DIRECTOR DE LA EESX  
P R E S E N T E

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título: **“EMPLEO DE SEDIMENTOS DE JAGÜEY EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA BÉNTICA PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD ”**. Que ha realizado el pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Industrial y de Sistemas, Ana Fernanda Lorenzana Ramírez**, otorgamos nuestro voto de aprobación para su impresión por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte.

**Atentamente**  
**Por una humanidad culta**  
Una universidad de excelencia

Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán

Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández

Dr. José Luis Gadea Pacheco

Dr. Esteban Montiel Palacios

M. C. I. María Lucrecia Díaz Flores

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRAN | Fecha:2023-06-27 12:57:27 | Firmante**

ll/sAXgVmtXZi+TYxuvU/w80i/cfY1zaXsmQAZZmdEnIEMIHM8Vhdz+Atzfzur6drvC5nbV1K4udzIw426DPskTIDyGNZY8mtjRy4Z+2bw2tDO86v1THyItKDchqOF2oDhbRxs0N9tZ  
0duFFRII/7khEnCaYYCfas/MQbp/ODD8J17wHosc7NT63x0ujrh+gxqt8GCwV+YyQtNHQCKYswvH/9NivOI3uNlvtPsa1tHvtOkJzSC2lJfPw2HB3hOrOtSfew6ag1V1ojiF7cjMlsmR  
vslyL4Hr2E1etf4DHN+dscvarvX0BlgrznKmtrogNJD+TFFFuJvrPxLvxg==

**FIDEL BENJAMIN ALARCON HERNANDEZ | Fecha:2023-06-27 14:11:53 | Firmante**

cVU5qBfZWxve2Duav4+iDBY0p7Tc6EvjhamPCWnoAN/JzUAT3OGY/DPnHONFY8t7vY4IKbpbmvgu+9VXw3sOHkTzOHHTQXxRb1xyhWRUxiTDhLt5ivk22zYs/caQpI5Mc21hTf  
Bs3tnL1p/v5JtbFgiRuDfcVUyLQocC2YKMEUN/DN4F2uvGyR1uWn5B8j31rZOPuLCSDX6le7TwtSTcmYEH6RXL8UqI9k7GcMgeVikDtMfC4QRJN/QLJiSfICVPhR7r2mXUWeXDT  
mhFOaUgGcZ9Yw+WcXiQoDqjg88+ey9zX4a6ux8S/f5lVXgJbQ3Wp3sYLFz8+D6W3RGgO36Cg==

**JOSE LUIS GADEA PACHECO | Fecha:2023-06-27 14:23:29 | Firmante**

KfyaYHLUtn8bw+Ob5+B03Bc7D+5SmZ/XppqsF4F189kiT8cwVkkEiX/jjmAwMTBtxmnuYuDNV+063xc6JwFztyyAPAzhg2kl6EcG6+x5Ot+Gay2xQqCsdK434efaWcZQAqeiU9q+  
H+8niWbFlmrgX/lhWxEPmXT/3whiclqi3pWUihzhy8QUTRS3e541rWf5MbYa9LygesD+d20F9T+u0t6BkUDm1GhZaG03fcp9595E/TIVf3gXLsMMGKZEPNzIH9JSJ+BpOAiepEnl  
doZO23l6qhNNbfvAgg2hytd1nmhiTDbSesAiQc7IKNvWlysQrrcO9OtFmw8hKYIQ8Q==

**ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2023-06-29 00:07:04 | Firmante**

xztV0ti4udOcc5lxK56I26dMpTQvin3hZGzIWtKiXiFeJNbf/GpmNFUU5ma1sF3F7N10bgavqz9DKMsqvEjYQCwJzselb3G2sb1Z5p9HmDBIHV6vp5+m4s92CRfLP0UirgeNAqbB/w  
JUWc8e+2S7sLcGHMfFCalmFTlwVBaaKKEsnTKcAbQRQ90oBcZoBV9aACudv7ty/tMPaeQvp3QDFMZgUfQXjmFwchmiQb/Qu3pJ+cFoibB3zGf5M2/fozj03XMTjAff2PH76lGzpl  
4OQRJo4XvONihvP9mNtbakb2norXl+3tNuzL+THmtBd8bgEcndPW+hkHi39b1+Mnw==

**MARIA LUCRECIA DIAZ FLORES | Fecha:2023-08-03 16:23:31 | Firmante**

sDUY/udg00i3qmVLUCR5CYvhEZcpGCrx5uz5YRZjG39TBghnEk5OqLZKpYxt/qg/ZcAORjsfYo0smx/qFZnqrbHd1fM2SWS+4K0F4tYN9J49mmYdpXSThaz5M5R4NOakZfNguez  
oXehcmrV/lSr9xaHKbHNSPsy0LRUDvbS94Tiwg3+XQrKxlojBhigTsqbXHn4brg+xlIzu/BqGy+Im5aVuDxgipn91SXyI5SSIXiladDQ9H6Hw4Ly5NuFt49wTjV7O91ewlDldwRjgkqDk  
XDtYJAn7gO/N63/TGac0/IVi1laREVlb4Fo2UuL+VYUBGDQ9DCulUZjtQCoBFGX4Q==

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



0UrqfFB87

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/bQBDpRefjHEio4BfoqUu1qMYx2cj1i01>

