



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS

---

---

LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA LIMPIA, EMPLEANDO UNA CELDA DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANA BÉNTICA

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERA INDUSTRIAL**

PRESENTA

**NICTIHA MARIANA CORTÉS VÉLEZ**

**DIRECTOR:** DRA. MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRÁN  
**CODIRECTOR:** DR. FIDEL BENJAMIN ALARCÓN HERNÁNDEZ

AYALA, MORELOS

MARZO 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC

Secretaría de Docencia Departamento de Servicios Académicos

Ayala, Morelos a 02 de febrero del 2021.

**DRA. JOSEFINA VERGARA  
SÁNCHEZ DIRECTORA DE LA  
EESX**

**P R E S E N T E**

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título **PRODUCCION DE ENERGIA LIMPIA, EMPLEANDO UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA BENTICA**. Que ha realizado la pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Industrial, Nictiha Mariana Cortés Vélez**, 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

Dr. Esteban Montiel Palacios

M.C Eréndira Salgado Baza

Dr. Cesar Torres Segundo

Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán

Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández

Av. Nicolás Bravo S/N, Interior Parque Industrial Cuautla, Ayala, Morelos. C.P. 62715 Tel: (777) 329 7981 Ext. 6500 y 6501 Email: eesxalostoc@uaem.mx



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:2021-02-02 17:51:54 | Firmante**

Bog8HTqfW0YbmoSUpkQRQVwMG/O9P+J1LpVs0vb0cELb+lock6Exh0dP9zBMWcjT84HW+n9SiEe+VwO7T+EUWmUT4Pn3JxM8jEvOX7hUiaP4cH8coYvCzWd4vGPWFJoYJBUcLWmNvDpiwrb+G4CVimGKlglPggBB2iPimjBr7+DSYxjGuFFu3512aEHcWxiGF2m9w/2RqfH9fmUZ7VyAv0FiryxiVUAwC+Rvzn/E1muQVCXNAUM2KmqQhnQhpK1jJsgfZDSOPBgSfmxokS6uJcGH5ZL5Pk54NCX8jGM4Bj0krAzjtnPmc1EnA3W0V3vCQpmBFK0USmKxqmYOcf7GQ==

**FIDEL BENJAMIN ALARCON HERNANDEZ | Fecha:2021-02-02 17:53:25 | Firmante**

vMKdN6z6vz00w7Li3UJbz99Afzf+J2PoSZFd4MDDW25um1hUpIW+BxLYQrrhBX393K7oWZ4GoDTmwX2WdxHZY8CTGizn0U4ZopXwjeLc+Dg0ogC2O/y5RKjsVSiviwsfRS4wz7T+PCOW3EFGjki0KwWHxj2KBYRJKrJpG5HjgWzX6aaRCXdNufcMjvAZCj7dcCtekHQWslPtu/+5ugfbaQB3nBNpSS9b/ki+P46qQeznT0HwDmrzKQCIZes7dFGM39HqILFD0DTJ2nMRBub7Cf2j82llyE4xXcNnVz4mBz9YPeWXI6ymvoYBkuKAzp8mFMYyCkQEGGX1Wu0Uf2w==

**CESAR TORRES SEGUNDO | Fecha:2021-02-02 19:35:44 | Firmante**

e0aXJv/fCdCLI+jpU7SfazM9LnlaQKc85Rd/JbNKV5il0chQVavgLulWJVAc1ysYlumKzCrdPIA5fe/m2qW2Wxh0XpXDW3WR/ZissBjbmJNycvRsre5CxoqcJTq9qzmZRDQ0iul7a/Wb2/guZ7z4LvcBx2/xuia5vHkrUq9T0T5QfSElvrJjyORayT33Da+eJIXGX+7wbP9MJi7xmcA1q86MPj0MSVohU+Fn2sQVLShP0ZlW5s1wpTe/fDK9RPB8cYUrBM342b+Mn5ceCAEnfkPk92bsZClx3OJ+5SgmLt+Sg7gQ94QH82kGriV27Mtk0jmfB2DY+JXM82CqfOFRg==

**ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2021-02-03 19:34:10 | Firmante**

3nzR8S6Uulm9od8DOGMxBWR0a7oy/k8a7hysYyWJ2aSfxut5JQFAvzZqw7IWwtPjIXbFEAAupKrlEwunVBZbtq+B5GEpSRrcA8EsnLpgeEsLaDoyoLJaQTfdECIbQVWdS/2ceDOBCEfY0yQNY50HdhOz+HXc9DWb0c+nA+/934KDS3gGQxMK/FOZw1J8uwVqV5KjM96we53iFdwYWhKmauDpZtmSRCIcTjJdR9J6/yf5PshmlYr86d6PEhndKo5/H4PgedxcF/02T/rCBp3T+ZoVQjixdX7tTOF90P1NJ0TOgZZJjUoVg964FX+y08GSTZeBHERU2qO+E0J9Hg==

**ERENDIRA SALGADO BAZA | Fecha:2021-02-12 13:40:36 | Firmante**

TCFQQ4OY06EZ7GuY3TjS9gEAXkyOHYigEmdDA6DYodyQmCqIXg7jNFR/ZkkJKxqonTwp5bstLhzMhv1t7ETrpyTp75Dm134gxp9SsSsmkRRT0wC8Tqdt+kOyLULUk9M9s6sLMuYQX7D6M0ehcWnNjzfk3MDIFQ2hoyvR6/wDd4ebNDHZO31CnJcMlnQrEBUTERbWZT+E19QoVM9GMqTjMPahEr3eVqDrjvdp8aLMIU/cT9Vade92kWKp41jVYqRqI4kHbQb+vVb/qPi7TIHuBWBx/LbHbpDq2uG68ceQL4H8CmFL9FZwl/sheN7N4WSTNnrH/zWjcpEfigGM4tA==



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

dqanRE

<https://efirma.uaem.mx/hoReputio/B5iFgQxt2tr4l9o9yy04jtpeCo7ido4l>

## **DEDICATORIA**

Dedico mi trabajo principalmente a Dios, por darme la vida y dejar que llegara hasta este punto de mi vida y a este nivel académico. A mi Madre, que, de no ser por ella y su esfuerzo para darme el estudio, al igual que su comprensión, su confianza, pero sobre todo su apoyo incondicionalmente a lo largo de este periodo. A mi padre que ha estado conmigo en todo momento. A mis hermanas, cuñados y sobrinos, que no dejaron de creer en mí y apoyarme en todo este proceso. A mi tía que estuvo conmigo en todo momento apoyándome. A mi amiga que estuvo conmigo en todo este proceso alentándome a no darme por vencida. A mis asesores que durante todo este periodo en el que realice el presente trabajo estuvieron asesorándome y apoyándome en todo momento. De igual manera a todas las personas que en algún momento de este proceso estuvieron apoyándome.

Y sobre todo a mí que sin mi esfuerzo y sobre todo la confianza a mí misma no hubiera podido lograr todo esto.

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a Dios, por permitirme llegar hasta este punto de mi vida y protegerme siempre.

Le agradezco a mi madre, por estar conmigo en todo momento acompañándome y creyendo en mí, y que también estuvo conmigo apoyándome para llegar hasta este momento.

Le agradezco mis hermanas que me apoyaron en todo momento y me aconsejaron a lo largo de todo este periodo.

Le agradezco a mi tía que estuvo conmigo en todo momento apoyándome y alentado me a seguir adelante.

Le agradezco al a Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán y al Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández que estuvieron asesorándome y brindando su apoyo a lo largo de este proyecto.

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO.....	5
ÍNDICE GENERAL .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Necesidades energéticas.....	11
1.2 Celdas de combustible microbianas bénticas .....	12
1.3 Objetivos .....	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos particulares .....	14
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	15
2.1 Combustibles Fósiles .....	15
2.2 Energías limpias .....	16
2.2.1 Energía Eólica .....	16
2.2.2 Energía hidráulica.....	17
2.2.3 Energía solar .....	18
2.2.4 Energía geotérmica .....	20
2.3 Celdas de Combustible Microbianas.....	21
2.3.1 Principales elementos de una celda de combustible microbiana .....	22

2.4 Celda de combustible microbiana b3ntica.....	24
2.4.1 Electrodo cat3dico.....	28
2.4.2 Electrodo an3dico.....	29
2.5 Transferencia extracelular de electrones.....	31
2.5.1 Transferencia directa.....	32
2.5.2 Transferencia indirecta.....	33
2.6 Desempeño de Celdas de Combustible Microbianas.....	34
2.6.1 Resistencia Interna de una CCM.....	36
2.7 Investigaciones sobre las Celdas de Combustible Microbianas B3nticas.....	36
CAPÍTULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	39
3.1 Aspectos Generales.....	39
3.2 Recolecci3n de Sedimentos.....	39
3.3 Diseño de la Celda de Combustible Microbiana B3ntica.....	40
3.3.1 Arquitectura.....	40
3.4 Electrodo.....	41
3.4.1 3nodo.....	41
3.4.2 C3todo.....	42
3.5 Ensamble de la Celda.....	42
3.6 Elaboraci3n del Dispositivo Experimental.....	43
3.7 Cambios al Dispositivo Experimental.....	47
3.5 Caracterizaci3n de la Celda de Combustible Microbiana B3ntica.....	48
3.5.1 Aclimataci3n.....	48
3.5.2 Caracterizaci3n mediante curvas de polarizaci3n y potencia.....	49
3.5.3 Determinaci3n de la resistencia interna del sistema.....	50

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	51
4.1 Aclimatación de la Celda Béntica.....	51
4.2 Voltaje como una función de la resistencia externa .....	52
4.3 Curva de polarización .....	54
4.3.1 Cálculo de la resistencia interna.....	55
4.4 Producción de potencia en la celda béntica.....	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....	60
REFERENCIAS .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Energía Eólica .....	17
Figura 2.2 Energía Hidráulica .....	18
Figura 2.3 Energía Solar. ....	19
Figura 2.4 Energía Geotérmica. ....	20
Figura 2.5 Detalles principales de una celda de combustible microbiana de cámara doble. .....	22
Figura 2.6 Detalles principales de una celda de combustible microbiana béntica. ....	25
Figura 2.7 Modelo simplificado para la conversión de combustibles orgánicos a electricidad. .....	27
Figura 2.8 Representación de los métodos de transferencia de electrones de los microorganismos hacia los electrodos, (a) Transferencia directa, en el cual los citocromos y/o pilis transfieren los electrones al electrodo; (b) Transferencia indirecta, donde los mediadores redox ayudan en la transferencia de electrones al electrodo. ....	32
Figura 2.9 Curva de polarización ideal para una celda de combustible microbiana. ....	35
Figura 3.1 Ubicación del jagüey con respecto a la Universidad. ....	39
Figura 3.2 Localidad donde se recaudaron los sedimentos .....	40
Figura 3.3 Esquema del montaje de la CCMB.....	41
Figura 3.4 Fibra de carbón .....	41
Figura 3.5 Malla de acero inoxidable .....	42
Figura 3.6 Esquema de la celda de combustible microbiana en 3D .....	43
Figura 3.7 Esquema en 2D y 3D con medidas. ....	44
Figura 3.8 Ánodo de fibra de carbón .....	44
Figura 3.9 Esquema en 3D y 2D .....	45
Figura 3.10 Cátodo de malla de acero inoxidable. ....	45
Figura 3.11 Esquema de la distribución de lodos y agua. ....	46
Figura 3.12 Primera parte del ensamble de la celda. ....	47

Figura 3.13 Esquema modificado. ....	47
Figura 3.14 Segunda parte del ensamble de la celda. ....	48
Figura 4.1 Colonización bacteriana de la celda béntica, catolito: agua pH 7. Voltaje medido a circuito abierto. ....	52
Figura 4.2 Voltaje de la CCMB como una función de la resistencia. ....	53
<i>Figura 4.3 Voltaje de la CCMB expresado en función de la corriente</i> .....	54
Figura 4.4 Resistencia interna de la celda de combustible microbiana béntica. ....	56
Figura 4.5 Producción de Potencia de la CCMB. ....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Reservas de combustibles fósiles en el mundo. ....	15
Tabla 2. 2 Materiales de electrodos anódicos. ....	30
Tabla 4. 1 Resumen de los parámetros obtenidos en la evaluación del desempeño de la CCMB; Ecuación de la recta, R <sup>2</sup> = coeficiente de determinación lineal, resistencia interna R <sub>int</sub> . ....	56
Tabla 4.2 Producción de potencia de diferentes celdas bénticas. ....	58

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Necesidades energéticas

La producción de electricidad a partir de combustibles fósiles ha sido la más importante del siglo XX y se anticipa que seguirá siendo dominante durante la mayor parte del siglo XXI. En la actualidad, el 80% del consumo energético del mundo proviene de los combustibles fósiles, y se distribuye de la siguiente forma: petróleo (34.4%), carbón (26.0%), y gas natural (20.5%). Otras formas de energía constituyen el 19.1% [SENER, 2006; Internacional Energy Outlook, 2008].

La Agencia Internacional de Energía (AIE) prevé que para el 2030, el porcentaje de electricidad generado con combustibles fósiles sea del 66%, mostrando que no solo disminuye el uso de esta fuente primaria, sino que aumenta ligeramente en este periodo de tiempo [World Energy Outlook, 2008]. Actualmente, las principales economías del mundo se encuentran empeñadas en reemplazar el uso de recursos fósiles por recursos limpios y renovables como fuentes de energía. Esta situación sugiere que los próximos años, se pueda estar asistiendo a una revolución tecnológica en el campo de la energía, con tremendas implicancias para los países y los consumidores.

Para prevenir los efectos catastróficos del cambio climático y garantizar la viabilidad de la sociedad, se requiere de una acción inmediata y determinada. Los líderes de la comunidad científica han recomendado que, para mitigar el cambio climático y sus efectos, es necesario construir una economía basada en la energía limpia [Internacional Energy Outlook, 2008].

La naturaleza ofrece muchas opciones para generar energía. Lo principal es entender cómo convertir la luz solar, el viento, la biomasa o el agua en electricidad o calor de la forma más eficaz y sostenible. México cuenta con abundante energía renovable y recursos humanos, capaces de realizar investigación y desarrollo para adaptar o crear tecnologías necesarias y promover la industria nacional. También cuenta con un marco legal, una estrategia y un

plan específicos para permitir una mayor participación de las energías renovables en el país. Aunado a la necesidad del uso de energías limpias, se encuentra la problemática de la contaminación del agua, que constituye un gran desafío para la sostenibilidad de los recursos hídricos y está despertando preocupaciones mundiales [Grey et al., 2013; Jessoe, 2013]. En nuestro país, se generan alrededor de 250 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales municipales. De esta cantidad se trata solamente cerca del 25%; el reto por resolver es enorme [Buitron,2011].

En general, se necesita 1 kWh de energía para la oxidación de materia orgánica que contiene un kilogramo de carbono presente en el agua, alrededor de 0.5 kWh por m<sup>3</sup> de agua residual a tratar. Existen procesos anaerobios que pueden reducir los costos de operación de los procesos, pero éstos son factibles cuando las aguas presentan altas concentraciones de materia orgánica, como las generadas en la agroindustria [Buitron,2011]. Las aguas residuales domésticas, pueden utilizarse eficientemente para generar electricidad en la novedosa tecnología de celdas de combustible microbianas (CCMs).

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 residuos orgánicos y biomasa renovable [Lovley, 2006; Wall et al., 2008; Wei et al., 2011]. Esta tecnología puede emplear una gran variedad de sustratos como combustible entre ellos; glucosa y acetato, e incluso aguas residuales. Recientemente, se han hecho esfuerzos por usar agua residual doméstica como combustible en una CCM debido a los problemas ambientales que estas representan y a la necesidad de reusar estos pasivos ecológicos.

## **1.2 Celdas de combustible microbianas bénticas**

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.

Entre las aplicaciones potenciales de estos dispositivos, es su utilización como fuentes de energía renovables 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; Dewan et al., 2014]. 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 [Navarro et al., 2017].

Las celdas de combustible microbianas utilizan la capacidad catalítica natural de los microorganismos para oxidar una amplia variedad de sustratos, al tiempo que producen electrones de forma que se puede recolectar en un electrodo. Microorganismos reductores de Fe (III) como *Shewanella putrefaciens*, *Clostridium butyricum*, *Aeromonas hydrophila*, *Rhodospirillum rubrum*, *Desulfobulbus propionicus* y varias especies de *Geobacteraceae* han demostrado transferir directamente electrones desde la oxidación de compuestos orgánicos a la superficie de un electrodo. sin la necesidad de un mediador de electrones.

En particular la bacteria del género *Geobacter*, tiene la capacidad de transferir electrones a moléculas como el Fe (III) y Mn (IV) [Lovley, 1991], óxidos de nitrógeno [Lovley, 1993], sustancias de alto peso molecular formadas por la degradación química y biológica de restos de plantas y de animales [Lovley, 1998]. Además, permite la transferencia de electrones de forma directa a los electrodos, generando pequeñas corrientes eléctricas [Gregory et al., 2004], esta característica le permite a la especie *Geobacter* jugar un papel importante en el ciclo natural de la materia orgánica y de los metales en los sedimentos acuáticos y

subsuelos [Phillips et al ,1993], en la biorremediación de compuestos orgánicos y en el metal contaminante presente en ambientes subterráneos [Lin et al, 2005].

La capacidad de las especies *Geobacter* para transferir electrones desde y hacia electrodos permite obtener electricidad a partir de materia orgánica [Bond et al, 2003], o el uso de electrodos como donador de electrones para la reducción de contaminantes tales como; nitrato, uranio y disolventes clorados [Wall et al, 2006; Gregory, 2005, Strycharz,2008]. Además, estas bacterias son capaces de fabricar Pilis, que pueden ser útiles en el desarrollo de dispositivos en la industria de microelectrónica [Reguera,2007].

En este trabajo se examinó el uso de sedimentos provenientes de un Jagüey, de la localidad de Cuautla, Morelos, para utilizarlos en la producción de electricidad en un dispositivo de celda de combustible microbiana béntica.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la producción de electricidad en una celda de combustible microbiana béntica tipo estanque, empleando sedimentos provenientes de un jagüey.

### **1.3.2 Objetivos particulares**

1. Diseñar y construir una celda de combustible microbiana béntica.
2. Evaluar la factibilidad de utilizar sedimentos de un Jagüey, para la producción de electricidad en una celda de combustible microbiana béntica.
3. Caracterizar la celda de combustible microbiana mediante curvas de polarización y potencia.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Combustibles Fósiles

El uso de combustibles fósiles está siendo cuestionado, fundamentalmente por la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se emite en la atmosfera, el cual contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), que es uno de los impulsores del cambio climático [González, 2009].

En la tabla 2.1 se muestra las reservas de distintos combustibles fósiles en el mundo y la relación entre el consumo anual y las reservas SENER (Secretaría de Energías de México). Es evidente que el combustible más abundante es el carbón, para el cual hay una relación reservas/consumos de 133 años y en el caso de gas natural y el petróleo, esta relación es menor, 60 y 40 años respectivamente, pero significativo.

*Tabla 2.1 Reservas de combustibles fósiles en el mundo [González, 2009].*

	<i>Mundo</i>			<i>México</i>		
	<b>Reservas</b>	<b>Producción</b>	<b>R/P*</b>	<b>Reservas</b>	<b>Producción</b>	<b>R/P*</b>
<i>Carbón</i>	847,488.00	6,396.00	133.00	1,211.00	12.00	99.00
	Millones ton	Millones ton/a	años	Millones ton	Millones ton/a	años
<i>Gas natural</i>	6,263,000.00	103,660.00	60.42	89.00	1.41 Millones	63.07
	Millones pc*	Millones pc/a	años	Millones pc*	pc/a	años
<i>Petróleo</i>	1.208,200.00	29,832.10	40.50	11,000.00	1,145.83	9.60
	Millones bls*	Millones bls/a	años	Millones bls*	Millones bls/a	años

*\*R/P Relación producción-consumo. \*pc pies cúbicos. \*bls barriles de petróleo*

## **2.2 Energías limpias**

La energía limpia es un sistema de producción de energía con exclusión de cualquier contaminación, la cual está en pleno desarrollo, dada la preocupación actual por la preservación del medio ambiente y por la crisis de energías agotables como el gas o el petróleo.

Hay que diferenciar la energía limpia de las fuentes de energía renovables: la recuperación de esta energía no implica, forzosamente, la eliminación de los residuos. La energía limpia utiliza fuentes naturales tales como el viento y el agua.

Las fuentes de energía limpia más comúnmente utilizadas son la energía geotérmica, que utiliza el calor interno de nuestro planeta, la energía eólica, hidroeléctrica y solar. En los siguientes apartados, se describen brevemente estos tipos de energía [Ruiz,2020].

### **2.2.1 Energía Eólica**

Produce energía a partir del viento, a través de aerogeneradores. Estos generadores provocan un movimiento en unas turbinas que son las que producen energía eléctrica. Están constituidos sustancialmente por dos partes: una mecánica, que tiene el propósito de transformar la fuerza del viento, casi en línea recta, ya que es precisamente la característica viento, en un movimiento de rotación respecto a un eje, y una parte electromecánica que provoca la transformación del movimiento rotativo en energía eléctrica.



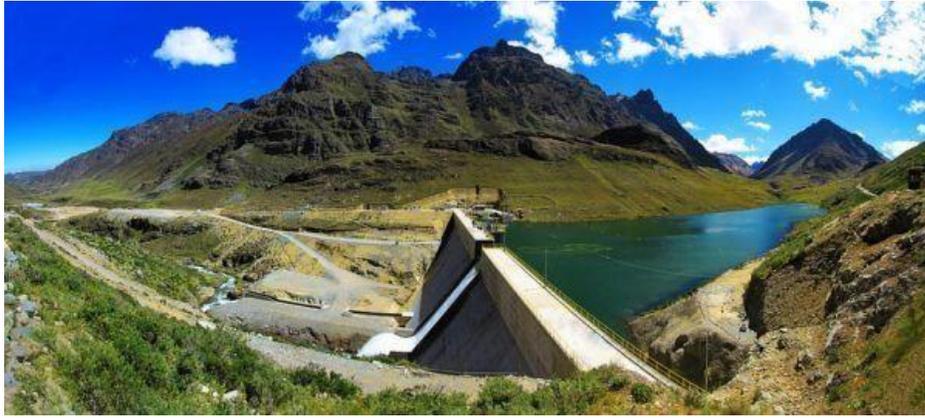
*Figura 2.1 Energía Eólica [Ruiz,2020].*

Los aerogeneradores se dividen en dos categorías: eje horizontal y eje vertical. Los generadores de eje horizontal son los más comúnmente utilizados y conocidos por la mayoría de las personas. Estos tienen, en promedio, una eficiencia mayor que aquellos con eje vertical, sin embargo, son más ruidosos.

Los generadores con eje vertical, aunque tienen una eficiencia ligeramente inferior, son cada vez más utilizados debido al hecho de que el ruido producido es muy pequeño o en algunos casos, está ausente. Otra ventaja del eje vertical reside en el hecho de que la dirección del viento no afecta a su rendimiento [Ruiz,2020].

### **2.2.2 Energía hidráulica**

Produce energía gracias al agua, aprovechando la energía cinética de mareas o corrientes. Este tipo de energía lleva siglos produciéndose, primero a pequeñas escalas con molinos de agua, ahora en grandes proporciones gracias a las centrales hidroeléctricas (Figura 2.2).



*Figura 2.2 Energía Hidráulica [Ruiz,2020].*

Es un tipo de energía limpia con numerosas ventajas, por ejemplo, es una fuente de energía absolutamente limpia y de cero emisiones, incluso el entorno que rodea a una planta hidroeléctrica es generalmente limpio, sin contaminación del aire.

Los costos de la energía producida de esta manera permanecen además entre los más bajos y la misma energía puede producirse continuamente de una manera completamente natural. Esto se debe a que los costos de mantenimiento y operación también son relativamente bajos una vez que se construye la central eléctrica, y la capacidad de la planta de energía es de dos a diez veces mayor en comparación con una planta de carbón o nuclear [Ruiz,2020].

### **2.2.3 Energía solar**

Es la que proviene de la radiación del sol. La energía solar puede aprovecharse de diferentes maneras: producir calor, calentar agua, producir electricidad. La energía solar es una energía renovable y totalmente limpia (Figura 2.3).



*Figura 2.3 Energía Solar [Ruiz,2020].*

A continuación, se describen los tipos de energía solar:

- **Solar fotovoltaico:** Los procesos fotovoltaicos se llevan a cabo con paneles fotovoltaicos, que toman la luz del sol y la convierten en electricidad. El componente elemental del generador es la célula fotovoltaica en la que se produce la conversión de la radiación solar en corriente eléctrica. Consiste en una delgada porción de material semiconductor, generalmente silicio.
- **Solar térmica:** Mediante los llamados colectores. Estos dispositivos recogen y concentran la luz solar para producir las altas temperaturas que se requieren en los procesos de calentamiento y de generación de electricidad. Además, los colectores de energía solar térmica más poderosos tienen mecanismos que les permiten seguir la trayectoria del sol. De ese modo, se pueden colocar siempre en la mejor posición para aprovechar la máxima energía posible.
- **Termodinámica solar:** Las plantas de energía solar concentradas, generalmente referidas como CSP (Concentrated Solar Power), son una de las tecnologías más recientes para la explotación de energía solar. La tecnología CSP aún no está completamente madura, pero tiene su punto fuerte en la posibilidad de suministrar electricidad independientemente del recurso. Estos sistemas se utilizan para producir

electricidad suministrando calor a alta temperatura a una planta en función de un ciclo termodinámico. El proceso se llama «conversión indirecta de energía solar» en oposición a la transformación directa en electricidad de energía solar (sistemas fotovoltaicos) [Ruiz,2020].

## 2.2.4 Energía geotérmica

Se produce a través de la extracción de calor del interior de la tierra. Se puede extraer el calor de los fluidos o de yacimientos en seco (magma). La temperatura aumenta a medida que nos acercamos al interior de la Tierra, por lo que dependiendo de la profundidad de extracción se obtendrá más o menos energía. Así, se puede conseguir energía desde para poner un suelo radiante hasta para poner una planta eléctrica, pasando por un balneario (Figura 2.4).



*Figura 2.4 Energía Geotérmica [Ruiz,2020].*

Típicamente, por su naturaleza, la Tierra tiene un gradiente térmico que aumenta en promedio 3 ° C cada 100 metros de profundidad; cuanto más se profundiza, más aumenta la temperatura. Esta fuente de energía natural solo puede usarse en ciertos contextos territoriales limitados. En algunas áreas particulares, la característica de aumentar la temperatura con el aumento de la profundidad tiende a aumentar y la temperatura del

subsuelo es ligeramente más alta que la media, debido a fenómenos volcánicos o tectónicos.

La principal ventaja es que es una fuente de energía renovable y, por lo tanto, limpia, que no implica daño y contaminación al medio ambiente. También permite el reciclaje de residuos, lo que resulta en ahorros. Otra ventaja es su disponibilidad [Ruiz,2020].

### **2.3 Celdas de Combustible Microbianas**

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs), son una tecnología emergente que podrían contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Una CCM es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno) (Figura 2.5) Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible [Pant et al., 2010] y ha sido estudiado ampliamente para la generación de energía eléctrica a pequeña escala [Du et al., 2007].

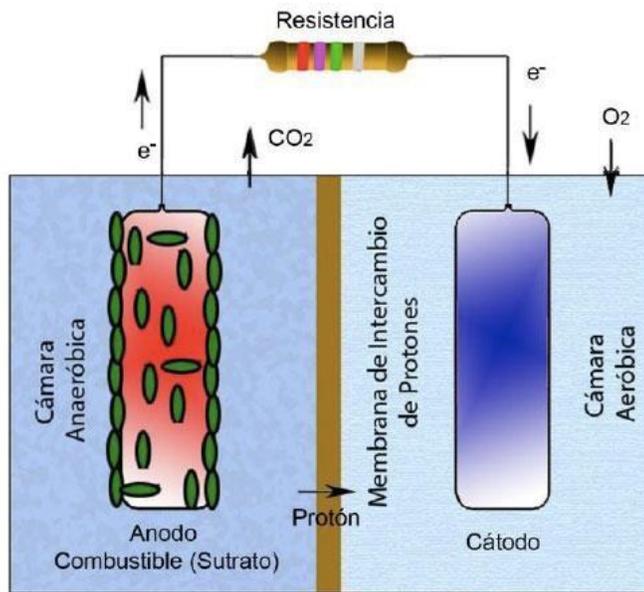


Figura 2.5 Detalles principales de una celda de combustible microbiana de cámara doble [Due et al, 2007].

### 2.3.1 Principales elementos de una celda de combustible microbiana

Como se mencionó en el apartado anterior, entre los elementos que conforma el diseño de una celda de combustible microbiana se encuentran: los electrodos del ánodo y cátodo, la membrana que separa ambos compartimientos, el sustrato o materia orgánica y los microorganismos que se utilizan como biocatalizadores.

Para los electrodos se pueden utilizar diferentes materiales como cobre, platino, grafito u otros [Falcon, 2009].

- Ánodo.

En determinadas circunstancias, el material que lo forma debe ser conductor, biocompatible y estable. Por otro lado, el material de electrodo más común es el carbono, en forma de grafito compacto, tiras o gránulos, como carbono vítreo y materiales de fibra (fieltro, tela, papel, fibra de espuma). El cobre también se puede utilizar porque es fácil de usar y práctico.

- Cátodo.

El oxígeno es el aceptor de electrones más viable debido a su poder oxidante, abundancia, disponibilidad, bajo costo, sostenibilidad y la menor cantidad de desechos químicos generados porque el producto final es agua. Además, debido a la relativa estabilidad del zinc, se puede utilizar zinc.

- Membrana.

Como componente del sistema, la membrana evita que los electrones fluyan desde la cámara del ánodo a la cámara del cátodo y permite que los protones pasen a través de ella. Puede tener varios tipos: membrana de intercambio de protones, membrana de ultrafiltración, puente de sal y otros materiales utilizados para la filtración [Liu et al, 2004]. La membrana más utilizada es MIP, entre las que es muy común Nafion, que es un producto de DuPont, EE. UU., Que muestra una alta permeabilidad a los protones, [Revelo et al, 2013].

- Sustrato.

Constituye el combustible que produce energía. En la literatura científica, existen varios tipos de trabajos que utilizan diversos sustratos como; glucosa, acetato, sacarosa, lactosa, almidón y otros compuestos puros. Para utilizar mezclas complejas para utilizar biomasa como método de biorremediación y generar energía.

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

La oxidación microbiana del sustrato de prueba y, por lo tanto, el rendimiento electroquímico de la batería será generalmente proporcional a la concentración del sustrato. La eficiencia del MFC también puede verse afectada por el pH. El gradiente de pH se genera por acidificación en el compartimento del ánodo y alcalinización en el compartimento del cátodo.

Esto se debe a que los protones se consumen en las reacciones del ánodo y del cátodo. Cuando la difusión y migración de protones a través del MIP avanza lentamente en la cámara del ánodo, se produce un pH ácido, lo que resulta en una fuerte disminución de la

actividad bacteriana, por lo que la transferencia de protones a la cámara del cátodo se ve afectada [Revelo et al, 2013]. Sin embargo, el flujo de protones y otros cationes alcalinos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) hacia la cámara del cátodo reduce el oxígeno y genera un pH alcalino. La disponibilidad de protones en el cátodo es un factor clave para determinar la eficiencia de la reducción de oxígeno, por lo que el pH ácido en la cámara del cátodo puede reducir significativamente la producción actual de MFC [Falcon, 2009].

- **Microorganismos**

Son la base de la transmisión de electrones, y los electrones están en la propia batería, desde la batería hasta el electrodo y desde el electrodo a la batería. Por tanto, estudiar sus interacciones, identificarlas y establecer sus roles en el proceso contribuirá a la mejora futura de los conocimientos básicos y el desempeño de estos sistemas [Liu et al, 2004].

Los principales factores que afectan la producción de energía son las vías metabólicas que controlan el flujo de electrones y protones, la influencia del sustrato y el potencial del ánodo. A un alto potencial de ánodo, las bacterias pueden utilizar la cadena respiratoria para llevar a cabo el metabolismo oxidativo y transferir electrones al ánodo. Sin embargo, si el potencial del ánodo disminuye, es probable que los electrones se depositen en otros aceptores de electrones (sulfato, nitrato, etc.) y sin él, se producirá la fermentación [Logan et al., 2006].

## **2.4 Celda de combustible microbiana béntica**

La celda de combustible microbiana béntica (CCMB) es un CCM con diferentes configuraciones de sistema, en el que el ánodo se entierra en un sedimento anaeróbico, mientras que el cátodo se suspende en una columna de agua aeróbica o agua en la superficie del ánodo para formar un cátodo aeróbico [Zhou et al., 2014; Wang et al., 2011].

Una celda de combustible microbiana béntica (CCMB), consta de un ánodo no corrosivo (típicamente grafito) incrustado a poca profundidad en sedimentos acuáticos, y conectado a través de un circuito eléctrico (por ejemplo, un instrumento científico marino) a un cátodo

(comúnmente grafito) colocado a unos cuantos centímetros debajo de la superficie del agua (Figura 2.6) [Tender et al.,2002; Reimers et al., 2001].

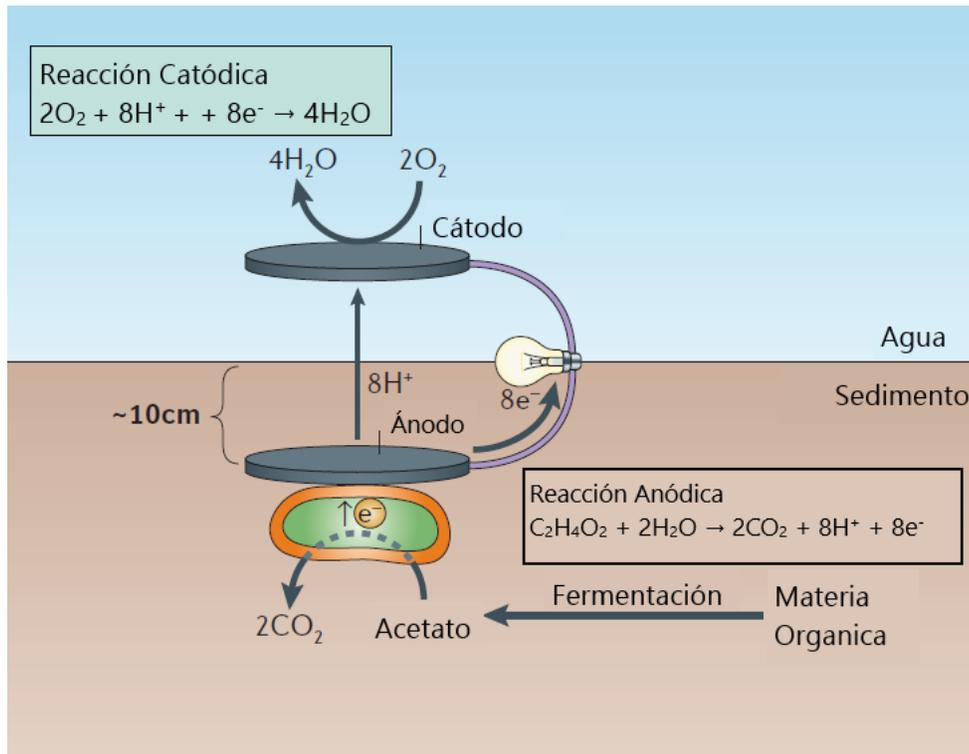


Figura 2.6 Detalles principales de una celda de combustible microbiana béntica [Lovley, 2006].

La materia orgánica reside en los sedimentos de muchos ambientes marinos, que generalmente se derivan del asentamiento de fitoplancton muerto y/o detritos vegetativos (Detrito o detritus es el resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas.), la materia orgánica contenida en los sedimentos, es el alimento de bacterias anaerobias y puede ser aprovechada en la tecnología de celdas de combustible microbianas bénticas [Yan,1997]. Además, en muchos ambientes marinos, los oxidantes como el oxígeno y el sulfato se suministran al sedimento desde el agua suprayacente por difusión y por acción del esfuerzo cortante en la interfaz sedimento-agua resultante del movimiento del agua suprayacente (por ejemplo, bombeo de marea (consiste en el movimiento de las mareas de

los océanos, y que es aprovechada por turbinas que hacen funcionar un alternador que es el encargado de producir energía eléctrica [Briceño, 2018]) y/o recuperación de sedimentos). En tales entornos, la combinación de materia orgánica y el suministro de oxidantes apoyan la actividad microbiana [Froelich et al, 1979].

Cuando se descubrió que ciertos microorganismos pueden transferir electrones directamente al ánodo (llamados electrones), esta tecnología logró importantes avances, ya que pueden ahorrar energía para mantener su crecimiento a través de la oxidación completa de compuestos orgánicos a dióxido de carbono, con la transferencia directa de electrones en ánodos de celdas de combustible microbianas [Hernández y Newman, 2001; Lovley, 2006; Debabov 2008].

Una gran diversidad de microorganismos que no son electrógenos puede también contribuir para la producción de corriente e incluso pueden ser necesarios. Estudios con sedimentos, en los cuales especies *Geobacter* usan su aceptor natural de electrones, óxidos de Fe (III), en lugar de electrodos, han sugerido que la materia orgánica compleja es degradada mediante la cooperación de microorganismos fermentativos y especies *Geobacter*, donde los sustratos fermentables son degradados a productos de la fermentación que especies *Geobacter* puedan oxidar. En una celda de combustible microbiana béntica, ocurre una cooperación similar en el procesamiento de materia orgánica compleja (Figura 2.7). La materia orgánica es hidrolizada a constituyentes, principalmente fermentados, los microorganismos que pueden oxidar completamente tales compuestos utilizan al electrodo como aceptor de electrones. Acetato y otros ácidos de la fermentación pueden ser oxidados completamente a dióxido de carbono, siendo el principal recurso de electrones para la producción de corriente [Wall et al., 2008].



### 2.4.1 Electrodo catódico

El cátodo es un factor limitante en el rendimiento de una CCM, debido a la pobre cinética de la reacción de reducción de oxígeno a pH neutro en un electrolito líquido. El flujo de oxígeno a través de un cátodo aireado es 3.7 veces más alta que en un cátodo acuoso [Cheng et al,2006].

La primera CCMB implementada a escala real en sedimento marino con platos de grafito como electrodos catódicos, mantuvo una densidad de potencia de 20 mW/m<sup>2</sup> por 4 meses, y generando un máximo de 28 mW/m<sup>2</sup>. Al observar que estos electrodos son frágiles, Reimers et al., (2006) propuso utilizar cátodos de cepillos de carbón obteniendo una densidad de potencia de 34 mW/m<sup>2</sup> por 125 días [Reimers et al,2006]. El rendimiento en las CCMB ha sido mejorado por Dumas et al. (2008) quienes propusieron trabajar con cátodos acuosos de acero inoxidable generando hasta 100 mW/m<sup>2</sup> por 45 días debido a las características de conducción del material [Dumas et al ,2008].

Erbil et al. (2013) utilizó biocátodos (los biocátodos son electrodos inoculados con microorganismos capaces de aceptar electrones y reducir compuestos que en su forma oxidada suelen ser contaminantes para los ambientes [Huang et al., 2011a; Huang et al., 2011b; Sharma y Kundu, 2010]) de acero inoxidable inmersos en el agua de mar colocados 10 cm arriba del sedimento marino generando un máximo de densidad de potencia de 32 mW/m<sup>2</sup> durante seis meses [Erbil et al,2013].

El rendimiento del cátodo podría ser influenciado negativamente por la disminución en la concentración de oxígeno disuelto (OD), especialmente en aguas contaminadas, donde las concentraciones de OD son bajas o incluso nulas, usando generalmente cátodos con recubrimiento de Pt para mejorar la velocidad de reacción de reducción de oxígeno, pero elevando los costos del sistema. Debido a estas complicaciones y a los elevados costos del catalizador, algunos autores como Wang et al., (2011) han propuesto usar biocátodos aireados flotantes en la superficie del agua, teniendo a las bacterias como catalizadoras en la reacción de reducción del oxígeno generando una densidad de potencia de 1,000 mW/m<sup>2</sup> con un electrodo de tela de carbón removiendo 70 % de materia orgánica en el sedimento

[Wang et al, 2011]. Otros autores como Zhang et al., (2009) propusieron usar cátodos aireados con catalizadores económicos como el carbón activado los cuales generaron 1,220 mW/m<sup>2</sup>, obteniendo valores mayores a los reportados en cátodos acuosos [Zhang et al,2009].

## 2.4.2 Electrodo anódico

El ánodo que es enterrado en el sedimento marino, sirve como soporte y aceptor para las bacterias presentes en el sedimento y a su vez favorecen la oxidación de la materia orgánica generando electrones y protones [Fu et al., 2014]. La transferencia de electrones extracelular se puede dar principalmente por transferencia directa de electrones, transferencia indirecta a través de mediadores y a través de pilas eléctricamente conductivas [Cui et al., 2015].

Los microorganismos actúan como catalizadores en esta reacción con la presencia de especies electroactivas (son todas aquellas sustancias con carácter oxidante y reductor, que son capaces de transportar carga, sin sufrir modificación atómica). Esta actividad catalítica es influenciada por el tipo de microorganismos nativos en el sedimento y por la disponibilidad de materia orgánica. El ánodo es un aceptor de electrones sólido, el cual favorece el crecimiento de las bacterias sobre su superficie, formando una biopelícula. Las bacterias electroactivas en el ánodo crecen lentamente, debido a las bajas concentraciones de carbono orgánico (0.1-10 % por gramo) en el sedimento, sin embargo, éste puede aumentar debido a la concentración de sustratos orgánicos (acetato, celulosa, quitina) cercanos al ánodo [Ewing et al., 2017].

La familia de las Geobacter es conocida como anodófilas que transfieren directamente sus electrones al electrodo anódico y las bacterias reductoras de azufre y hierro son clasificadas como electrófilas que donan indirectamente sus electrones a través de sus ciclos, sin embargo, estas reacciones no ocurren igual a través de todas las capas del sedimento. En general, la frontera entre el sedimento y el agua está bajo condiciones ricas en oxígeno (3-

14 mg/L), éste se encuentra difuso en el sedimento y la materia orgánica es consumida por la respiración aerobia de microorganismos heterotróficos en los primeros 0.5 cm del sedimento

Microorganismos de los géneros *Shewanella* y *Geobacter* pueden usar aceptores de electrones residentes fuera de la célula. Ambas especies secretan a escala nanométrica, filamentos proteicos, referidos como pilas o nanowires, que se extienden a otras superficies en la matriz extracelular para transportar los electrones, transportándolos de célula a célula y reduciendo oxidantes insolubles [Sinder et al, 2012].

An et al. (2015) evaluaron el rendimiento de las CCMB con respecto a la posición de los ánodos en el sedimento, colocando de forma horizontal y vertical los electrodos de placas de grafito a diferentes profundidades, indicando que de forma longitudinal se obtiene una densidad de corriente y potencia de 121 mA/m<sup>2</sup> y 20 mW/m<sup>2</sup> respectivamente, y de forma horizontal una densidad de corriente y potencia de 140 mA/m<sup>2</sup> y 14.7 mW/m<sup>2</sup> con una profundidad de 8 cm, observando que de forma longitudinal se obtiene mayor densidad de potencia y de forma horizontal mayor densidad de corriente.

En la tabla 2.3 se enlistan diferentes materiales para electrodos anódicos y sus rendimientos [An et al, 2015; González, 2019].

Tabla 2. 2 Materiales de electrodos anódicos [González, 2019].

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	*	[Nagayoshi et al, 2016]
CCMB	Fibra de carbón	190	Agua dulce	Sedimentos acuáticos	100	[Karra et al, 2013]
CCM	Acero		Agua	Agua		[Song et

Inoxidable	500	residual	residual	0.125	<i>al, 2015]</i>
304		doméstica	doméstica		

\*No reportado

## 2.5 Transferencia extracelular de electrones.

En las CCM se encuentran microorganismos que tienen la capacidad de transferir sus electrones a un aceptor final externo, este fenómeno se denomina transferencia extracelular de electrones (TEE), y se encuentra en microorganismos que pueden oxidar completamente los compuestos orgánicos a dióxido de carbono con electrodos de grafito o de metales, o con óxidos de metales como Fe (III) o Mn (IV) que actúan como el aceptor de electrones. En las CCM, este proceso desempeña un papel clave en la producción de energía, ya que los microorganismos que poseen dicha capacidad son prometedores catalizadores para la conversión eficiente de una variedad de desechos orgánicos a electricidad, y simultáneamente producen una biomasa renovable [Reguera et al, 2006; Choi et al, 2015; Schröder et al, 2015].

Es importante resaltar que el proceso de transferencia de electrones desde la cadena respiratoria de un microorganismo hasta el electrodo es crucial para la operación de una CCM. Estos procesos están siendo investigados para explicar los mecanismos involucrados. Algunos autores comienzan a llamar a dicho proceso como una nueva forma de respiración llamada respiración anódica [Torres, 2014]. La TEE se puede categorizar en dos tipos, la transferencia directa y transferencia indirecta de electrones (Figura 2.9) [Rabaey et al, 2010].

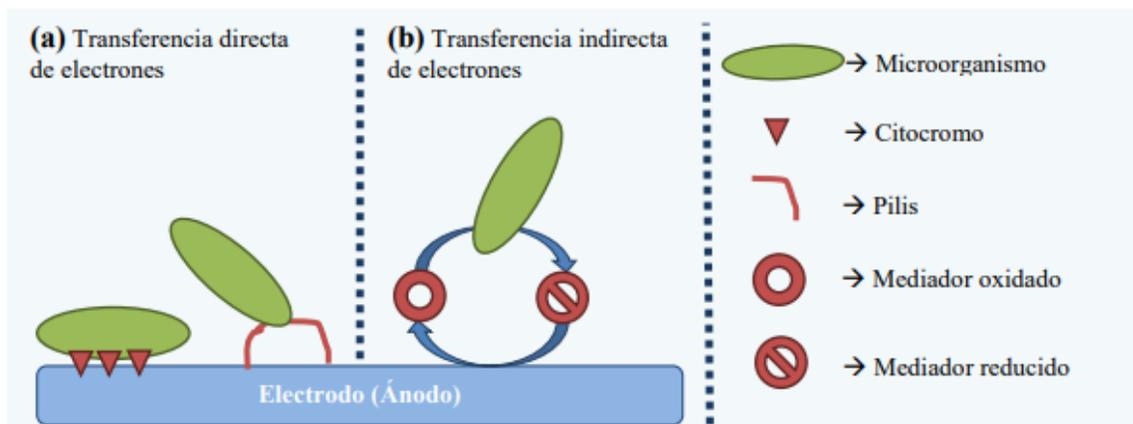


Figura 2.8 Representación de los métodos de transferencia de electrones de los microorganismos hacia los electrodos, (a) Transferencia directa, en el cual los citocromos y/o pilis transfieren los electrones al electrodo; (b) Transferencia indirecta, donde los mediadores redox ayudan en la transferencia de electrones al electrodo [Rabaey et al, 2010].

## 2.5.1 Transferencia directa

Los electrones producidos durante el metabolismo microbiano pueden ser transferidos hacia los electrodos por medio de los citocromos dispuestos en la membrana y/o pili eléctricamente conductivos como se observa en la Figura 2.9a [Kumar et al, 2015].

Los citocromos son proteínas que tienen como grupo prostético a un anillo porfirínico con hierro (grupo hemo). Los citocromos llevan a cabo oxidaciones y reducciones mediante la pérdida o ganancia de electrones aislados por el átomo de hierro situado en el centro de la molécula, de acuerdo con la siguiente reacción:



Existen varias clases de citocromos cuya diferencia radica en sus potenciales de reducción. Un citocromo puede transferir electrones a un aceptor (citocromo, quinona, Fe/S) siempre que tenga un potencial de reducción más positivo y pueda a su vez, aceptar electrones de un donador con un potencial de reducción menos negativo. Los distintos citocromos se designan por letras (a, b, c) dependiendo del tipo hemo que contengan [Madigan et al, 2009]. Los citocromos c de la membrana externa y los pilis de las células conductoras ayudan a

facilitar la transferencia directa de electrones [Patil et al, 2012]. Los resultados experimentales sugieren que el complejo OmcZ es el citocromo C más importante en las biopelículas [Ravinder et al,2015].

Para el flujo de electrones en los pilis existen tres mecanismos principales para la transferencia: *tunneling*, *hopping* y *delocalization* (conductividad metálica). En los mecanismos de tunneling y hopping los electrones están asociados con portadores discretos que pueden atravesar uno o más sitios para migrar a grandes distancias. El mecanismo de *delocalization* es sustancialmente diferente a los de *tunneling* y *hopping*, ya que en lugar de que los electrones se ubiquen en moléculas individuales, los electrones se encuentran deslocalizados a lo largo de una cadena de moléculas y son libres de moverse por todo el material [Malvankar, 2012; Lovley, 2014].

## 2.5.2 Transferencia indirecta

La transferencia indirecta de electrones se lleva a cabo cuando sustancias solubles o insolubles llamadas mediadores redox participan como intermediarios en el transporte de electrones entre el electrodo y los microorganismos (Figura 2.8b). Dichas sustancias son reducidas por el microorganismo y se oxidan en el electrodo, completándose así el transporte de electrones. Muchos microorganismos con transferencia extracelular de electrones secretan mediadores redox para promover la transferencia de electrones a los electrodos [Logan, 2008].

En algunos casos, estos mediadores redox se añaden a las CCM, porque ayudan a la transferencia de electrones del microorganismo al electrodo, al igual que ciertos microorganismos que no tienen respiración extracelular pero que pueden utilizar estos mediadores para la transferencia de electrones, como es el caso de las levaduras [Hubenova et al, 2015]. Estos últimos son microorganismos más complejos en comparación a bacterias y de un gran interés biotecnológico. Algunos de los mediadores redox identificados son fenazinas, flavinas, enzimas solubles, melanina y ácidos húmicos [Logan,

2008].

Así, para conocer mejor los fenómenos involucrados en el proceso de transferencia de electrones desde la cadena respiratoria de un microorganismo hasta el electrodo, es importante contar con el microorganismo aislado, lo cual permitirá conocer y analizar la especie a mayor detalle.

## 2.6 Desempeño de Celdas de Combustible Microbianas

Entre los parámetros utilizados para evaluar el desempeño de CCMs se encuentran: la resistencia interna, el voltaje a circuito abierto (OCV, por sus siglas en inglés), y la potencia máxima ( $P_{\max}$ ) [Watanabe, 2008].

Las curvas de polarización son una herramienta fundamental para caracterizar el desempeño de celdas de combustible [Clauwaert et al., 2008]. Una curva de polarización representa la pérdida de voltaje como una función de la corriente que sale de una CCM, si la corriente no se usa, entonces el voltaje disponible en la CCM será mayor [Logan, 2008].

Debido a las pérdidas de voltaje en una CCM, su desempeño no es el óptimo. El desempeño ideal de una CCM depende de las reacciones electroquímicas que ocurren en ambos electrodos [Du et al., 2007]. El máximo voltaje que puede ser alcanzado por una CCM, puede ser calculado usando la pareja acetato-oxígeno [Logan, 2008], entonces para la reacción anódica se tiene un potencial dado por el par redox;  $\text{CH}_3\text{COO}^-/\text{HCO}_3^-$  (-0.300 V) y para la reacción catódica;  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  (0.805 V). Entonces la CCM desarrollará una diferencia de potencial termodinámico de 1.10 V dado por la ecuación:  $\Delta E^{0r} = E^{0r}_{\text{cat}} - E^{0r}_{\text{an}}$ .

El potencial termodinámico ( $\Delta E^{0r} = 1.10$  V), no toma en cuenta ninguna pérdida asociada con la cinética de las reacciones que ocurren en los electrodos y se obtiene de la combinación de las reacciones que ocurren en el ánodo y en el cátodo como se ilustra en la Figura 2.8 región (a). Sin embargo, en la realidad una CCM se aleja de su potencial termodinámico (pierde voltaje), debido a sobrepotenciales (Figura 2.8 curva b).

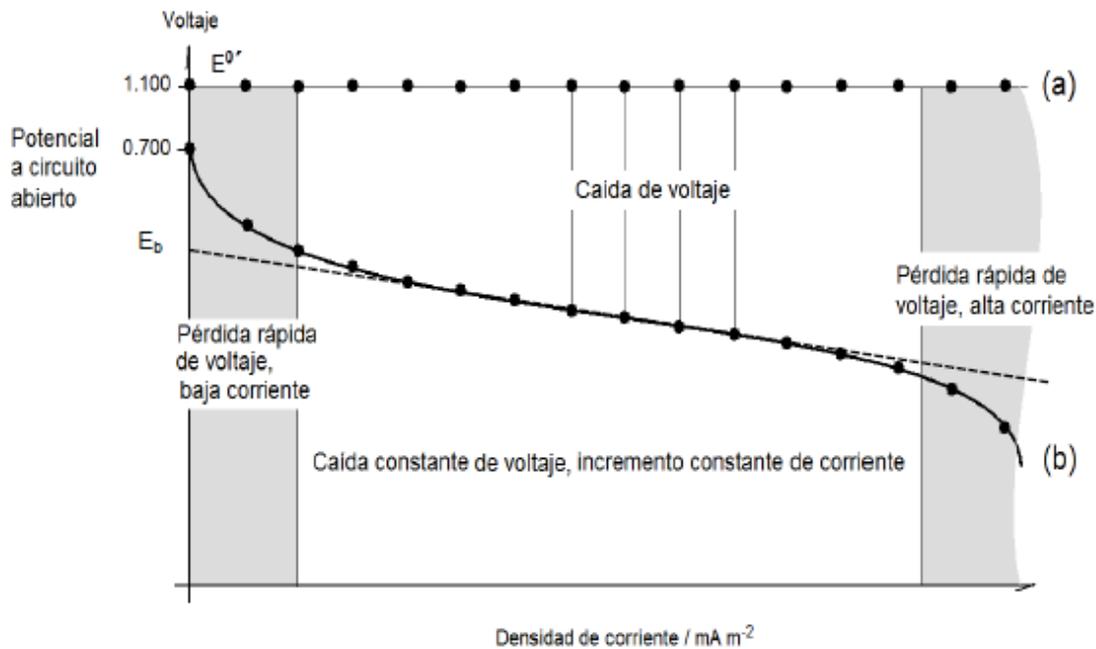


Figura 2.9 Curva de polarización ideal para una celda de combustible microbiana [Fuentes,2013].

El OCV, es el potencial experimental más alto que puede desarrollar una CCM, y se alcanza únicamente bajo una condición donde hay una resistencia infinita (es decir, una resistencia muy grande), por ejemplo, cuando se conecta un multímetro a la CCM, la corriente en este caso es muy cercana a cero.

Las principales irreversibilidades que afectan el desempeño de una CCM son: pérdidas por activación, pérdidas óhmicas y pérdidas por transporte de masa. Las pérdidas son definidas como el voltaje requerido para compensar por la pérdida de corriente debido a reacciones electroquímicas, transporte de carga, y procesos de transferencia de masa, que tienen lugar en ambos compartimientos anódico y catódico. La extensión de estas pérdidas varía de un sistema a otro. La producción de voltaje real ( $\Delta E_{CCM}$ ) de una CCM puede ser determinado sustrayendo las pérdidas de voltaje asociadas con cada compartimiento del voltaje predicho termodinámicamente como sigue:

$$\Delta E_{CCM} = \Delta E^{0'} - \sum |\eta| - \sum IR_{Ohmicas} \quad 2.1$$

Donde  $\Delta E^0$  es el voltaje predicho termodinámicamente, el siguiente término incluye los sobrepotenciales del ánodo y cátodo  $\Sigma|\eta| = |\eta_a| + |\eta_c|$ , estas pérdidas están relacionadas con las pérdidas por activación y transporte de masa en ambos electrodos, finalmente  $\Sigma IR_{Ohmicas}$ , representa las pérdidas óhmicas. Estas pérdidas, son las más importantes en el diseño de una CCM, ya que es esta región de la curva donde se ubica la máxima producción de potencia que alcanza una CCM, estarán determinadas por la resistividad de los diferentes conductores (electrodos, colectores de corriente, cables, membranas y electrolito) por un lado, y la configuración de la celda por otro lado [Clauwaert et al., 2008].

Las pérdidas óhmicas pueden minimizarse reduciendo la distancia entre los electrodos, incrementando la conductividad de la solución y capacidad de buffer y asegurando buen contacto entre el circuito y los electrodos [Logan, 2008].

### 2.6.1 Resistencia Interna de una CCM

El aspecto más notable de la curva de polarización 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 2.8), la cual puede ser expresada como:

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

Donde  $R_{int}$  es la resistencia interna total de una CCM, la cual puede ser fácilmente obtenida de la pendiente de la línea curva (b). La intersección de la curva lineal con el eje del voltaje (E),  $E_b$  es referido como la extrapolación lineal del voltaje a circuito abierto, esto es la extrapolación de la parte lineal de la curva de polarización. El valor de  $E_b$  debería ser cercano, pero menor que el voltaje medido a circuito abierto (OCV).

## 2.7 Investigaciones sobre las Celdas de Combustible Microbianas Bénticas

Reimers y sus colaboradores, fueron los precursores en la utilización de las CCMB, obteniendo  $10 \text{ mW/m}^2$  en la CCMB con electrodos de fibra de carbón con una separación entre los electrodos de 1-20 cm, con 5-6 % de materia orgánica en el sedimento y carbono orgánico de 3-3.5% [Reimers et., al 2001]. Dumas et., al, (2008) y Lenin Babu et al, (2012) coinciden en que los sedimentos poseen actividad microbiana en la superficie anóxica del sedimento; estos microorganismos se caracterizan por donar sus electrones sin requerir la incorporación de proteínas (enzimas) mediadoras, generando hasta  $20 \text{ mW/m}^2$  en agua salina utilizando electrodos anódicos de aluminio y grafito [Dumas et., al, 2008; Lenin et., al, 2012].

Jeffrey and Morris et al. (2012), se enfocaron en estudiar la biodegradación de sedimentos contaminados por hidrocarburos analizando sedimentos del pacífico de Estados Unidos, observando que las CCMB removieron 24% de hidrocarburo (inicial: 15,958 mg de hidrocarburo/kg de sedimento, final: 12,066 mg de hidrocarburo/kg de sedimento después de 66 días) obteniendo una densidad de potencia de  $2,162 \text{ mW/m}^2$ , con carbono orgánico total de 18.590 mg de carbono/kg de sedimento, utilizando electrodos de papel carbón y tela carbón con Pt ( $0.35 \text{ mg Pt/cm}^2$ ). Thomas et al. (2013), utilizaron CCMB con el objetivo de desarrollar un sistema de manejo de potencia para monitorear un sistema inalámbrico de telecomunicaciones a escala laboratorio. Ellos utilizaron electrodos de fieltro de carbón como cátodos debido a que es altamente microporoso y un ánodo de gránulos de carbón como soporte de los microorganismos, reportando un máximo de densidad de potencia y corriente de  $312.5 \text{ mW/m}^2$  y  $825 \text{ mA/m}^2$  respectivamente.

Otros estudios se han centrado en encontrar cual es el sitio correcto de profundidad del ánodo, para mejorar el rendimiento. An et al. (2013), Cinco placas rígidas de grafito incrustadas divididas en partes de sedimento uniformes, que van desde 2 cm (A1) a 10 cm (A5) por debajo de la capa de sedimento superior. La potencia máxima y la corriente del MFC aumentan en orden de profundidad. Sin embargo, a pesar del aumento de la resistencia interna, la potencia y la densidad de corriente del A5 MFC son 2,2 y 3,5 veces mayores que las del A1 MFC, respectivamente. Además, el potencial de circuito abierto del

ánodo (OCP) de la celda de combustible microbiana del sedimento (SMFC) se vuelve cada vez más negativo con la profundidad del sedimento. Basándose en estos resultados, se puede concluir que a medida que aumenta la profundidad de inserción del ánodo, el entorno del ánodo es termodinámicamente y cinéticamente beneficioso para el ánodo o el electrófilo.

En el trabajo realizado por Rousseau et al. (2015), evaluaron el potencial de generación de energía con respecto a la variación de la salinidad (517,776 y 1034 mM), realizando modificaciones al electrolito, generando un máximo de densidad de corriente de 85 A/m<sup>2</sup> al colocar 517 mM con una eficiencia Coulómbica de 23.7% [Raphael et al,2013].

Ewing et al. (2014) [Timothy et al, 2014], evaluaron dos configuraciones diferentes, la primera con un ánodo y un cátodo (área de los electrodos de 0.36 m<sup>2</sup> para ambos electrodos) y la segunda con una configuración de 4 ánodos y 4 cátodos formando un stack con un área de 0.09 m<sup>2</sup> para ánodos y cátodos, el material del electrodo catódico y anódico fue fieltro de grafito, obteniendo el mejor resultado en el ensamble de menor área con mayor número de electrodos generando 4,300 mW/m<sup>2</sup> como máximo de densidad de potencia en conjunto.

# CAPÍTULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

## 3.1 Aspectos Generales

En este capítulo, se describe el proceso de recolección de los sedimentos para el funcionamiento de la celda de combustible microbiana béntica, así como su arquitectura, detallando sus características y componentes. Además, se describe el proceso de caracterización del sistema, que en términos generales incluyó:

- La etapa de aclimatación de la celda.
- Caracterización de la celda mediante curvas de polarización y potencia.
- Determinación de la resistencia interna del sistema.

## 3.2 Recolección de Sedimentos

Los sedimentos se recolectaron en un jagüey de la localidad de Ayala, Morelos, como se muestra en la Figura 3.1.



*Figura 3.1 Ubicación del jagüey con respecto a la Universidad.*

La recolección se realizó los días 29 de febrero y 7 de marzo del 2020. Para ello se escarbó a una profundidad de 30 cm aproximadamente (Figura 3.2), y a partir ahí se tomaron los sedimentos colocándolos en dos recipientes de aproximadamente 3 kg, enseguida se cubrieron con una tapa hasta su utilización. Los microorganismos contenidos en los sedimentos sirvieron como biocatalizadores en la producción de electricidad, mientras que la materia orgánica sirvió como fuente de carbono para los microorganismos.



*Figura 3.2 Localidad donde se recaudaron los sedimentos*

*Fuente: Imagen propia*

### **3.3 Diseño de la Celda de Combustible Microbiana Béntica**

#### **3.3.1 Arquitectura**

La celda de combustible microbiana béntica (CCMB), tuvo una configuración tipo estanque. El sistema simuló las interfases sedimentos-superficie acuática de un ambiente natural. El dispositivo consistió de una pecera de vidrio de 20 cm de ancho, 40 cm de largo por 24.5 cm de alto, con un volumen total de la celda de 19,600 cm<sup>3</sup>.

La Figura 3.3 muestra un esquema de lado lateral del montaje de la celda de combustible

microbiana béntica.

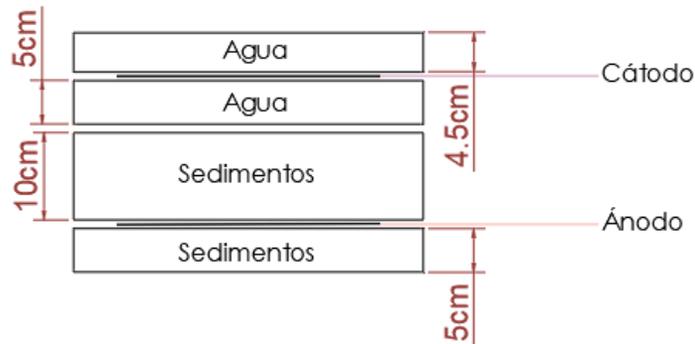


Figura 3.3 Esquema del montaje de la CCMB.

Fuente: Imagen propia

## 3.4 Electrodo

### 3.4.1 Ánodo

Para el ánodo se empleó de fibra de carbón (*Fibre Glast Developments Corporation*) (Figura 3.4), sin ningún catalizador. El ánodo tuvo las siguientes dimensiones: 30 cm x 16.5 cm, con un área de 495 cm<sup>2</sup>, por cada cara expuesta a los sedimentos, teniendo un área total de trabajo de 990 cm<sup>2</sup>.



Figura 3.4 Fibra de carbón

Para la conexión al exterior, se empleó una extensión de fibra de carbón de las siguientes dimensiones: 3 cm x 29.25 cm con un área de 87.75 cm<sup>2</sup>.

### **3.4.2 Cátodo**

Para el cátodo se empleó malla de acero inoxidable (Figura 3.5), sin ningún catalizador. El ánodo tuvo las siguientes dimensiones: 30 cm x 16.5 cm, con un área de 495 cm<sup>2</sup>.



*Figura 3.5 Malla de acero inoxidable*

Se empleo con la malla de acero inoxidable una extensión de 3cm x 15cm para realizar una conexión con el exterior, y de esta manera poder efectuar las medidas electroquímicas.

### **3.5 Ensamble de la Celda**

En la Figura 3.6, se muestra el esquema de la celda de combustible microbiana béntica en 3D, y la ubicación de los electrodos en el sistema.

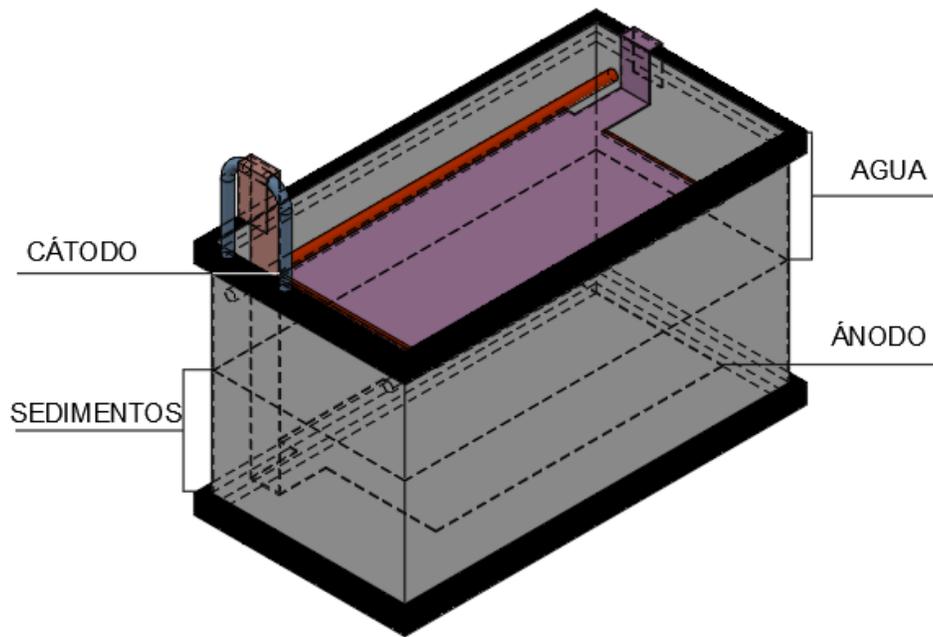


Figura 3.6 Esquema de la celda de combustible microbiana en 3D

Fuente: Imagen propia

### 3.6 Elaboración del Dispositivo Experimental

Para el ensamble de la celda, se cosió al ánodo una pestaña de fibra de carbón para las mediciones al exterior. En la Figura 3.7 se muestra el esquema en 3D y en 2D con las medidas del ánodo.

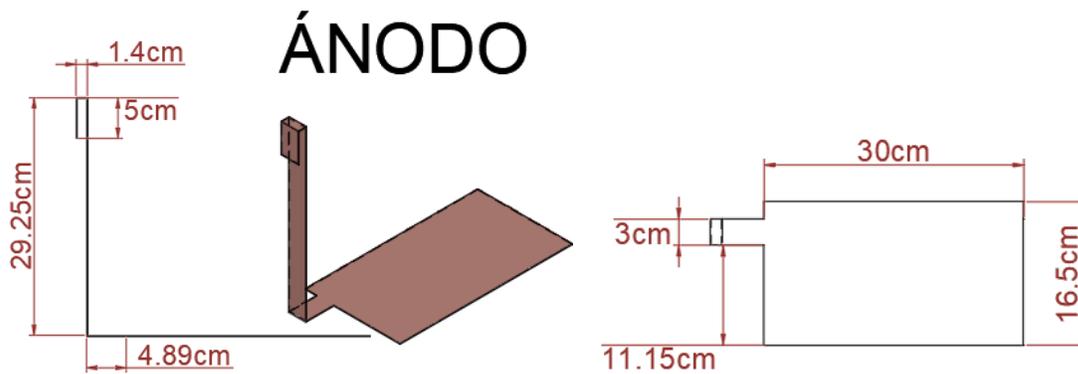


Figura 3.7 Esquema en 2D y 3D con medidas.

*Fuente: Imagen propia*

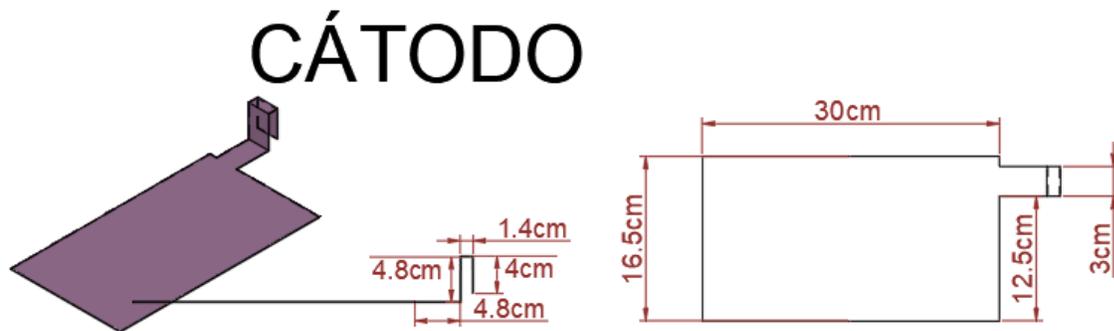
En la Figura 3.8 se muestra el ánodo de fibra de carbón una vez realizadas las modificaciones correspondientes.



Figura 3.8 Ánodo de fibra de carbón

*Fuente: Imagen propia*

Para el cátodo se utilizó malla de acero inoxidable la cual de igual manera tuvo las dimensiones de 30 cm x 16.5 cm en la Figura 3.9 se muestra el dibujo en 3D y en 2D con las respectivas medidas de éste.



*Figura 3.9 Esquema en 3D y 2D*

*Fuente: Imagen propia*

A la malla de acero inoxidable puesto que estará expuesta en el agua y es más pequeña que la superficie se tuvo que realizar un soporte la cual pueda sostener la malla, para esto se le colocaron popotes en las orillas, esto para darle más firmeza, después se unieron dos popotes y se recortaron para que la pudieran sostener en la Figura 3.10 se muestra la malla con los popotes una vez puestos.



*Figura 3.10 Cátodo de malla de acero inoxidable.*

*Fuente: Imagen propia*

Después de acuerdo a las dimensiones de la pecera se realizó la distribución de los lodos y

el agua con respecto al ánodo y cátodo como se muestra en la Figura 3.11.

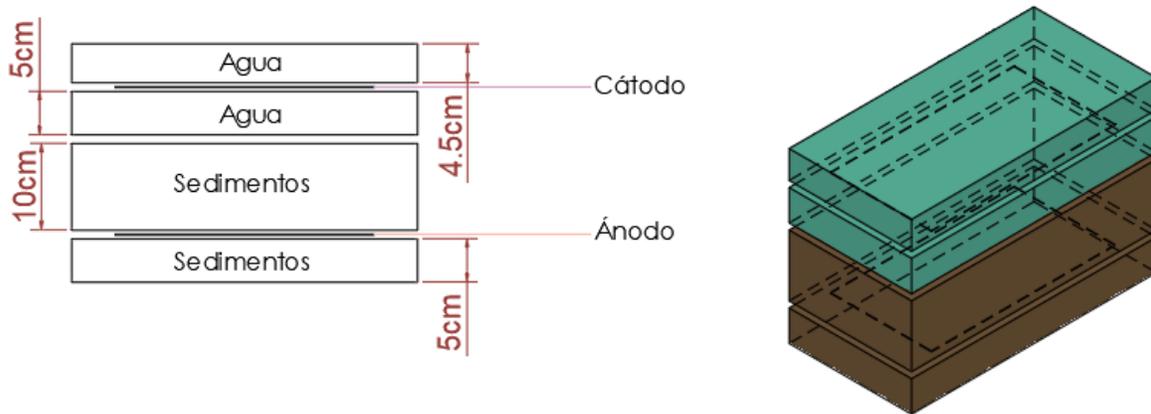


Figura 3.11 Esquema de la distribución de lodos y agua.

Fuente: Imagen propia

La pecera que se utilizó tenía las dimensiones de 40 cm x 20 cm x 24.5 cm, con un volumen de 19,600 cm<sup>3</sup>. Se señalaron los niveles en los cuales se colocarían los sedimentos, el ánodo, cátodo y el agua. Después se comenzó con el ensamble de la celda en la cual se colocó la primera capa de sedimentos hasta los 5 cm con un volumen de 4,000 cm<sup>3</sup>, después se acomodó en el sedimento la fibra de carbón (ánodo) colocándola en el centro, se colocó la pestaña (con dimensiones de 39.35 cm x 3 cm) hasta el borde de la pecera, y se sacó a la superficie para la conexión al exterior.

Después se colocó la segunda capa de sedimentos de 10 cm con un volumen de 8,000 cm<sup>3</sup>, dejar hasta los 7 cm con un volumen de 5,600 cm<sup>3</sup>, para la conservación de los sedimentos se le agregó agua con el fin de preservar el lodo puesto que podría secarse

En la Figura 3.12 se muestra el procedimiento del ensamble de la celda.



Figura 3.12 Primera parte del ensamble de la celda.

Fuente: Imagen propia

### 3.7 Cambios al Dispositivo Experimental

Se colocó una capa de 40 cm x 20 cm x 5 cm de sedimentos sobre la pecera, en seguida el electrodo de fibra de carbón, luego se colocó una capa de 40 cm x 20 cm x 8 cm de sedimento, posteriormente se colocó agua de la llave 40 cm x 20 cm x 7 cm o volumen de 5.6L, y el electrodo de acero inoxidable suspendido en el agua, rellenando con agua para cubrir el electrodo 40 cm x 20 cm x 4.5 cm más.

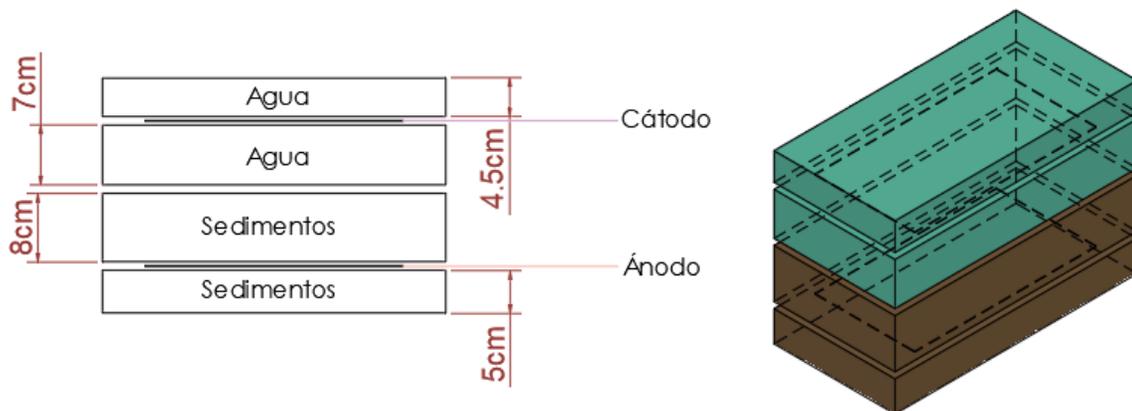


Figura 3.13 Esquema modificado.

Fuente: Imagen propia

Como se reestructuró la distribución, se remarcó hasta donde estarían distribuidos los

sedimentos, el cátodo y el agua.

Se procedió a sacar el agua a la pecera que se había agregado, después se colocó el lodo hasta los 8 cm lo cual no dio un volumen de  $6,400 \text{ cm}^3$ . Se agregó el agua hasta los 7 cm con un volumen de  $5,600 \text{ cm}^3$  y se colocó a presión el cátodo de malla de acero inoxidable, como último se agregó el agua hasta los 4.5 cm con un volumen de  $3,600 \text{ cm}^3$ .

En la figura 3.14 se muestra la segunda parte del ensamble de la celda.



*Figura 3.14 Segunda parte del ensamble de la celda.*

*Fuente: Imagen propia*

## **3.5 Caracterización de la Celda de Combustible Microbiana Béntica**

### **3.5.1 Aclimatación**

Una vez que se efectuó el montaje de la CCMB, ésta se mantuvo en operación utilizando como fuente de carbono la materia orgánica contenida en los sedimentos. Durante el periodo de aclimatación, la celda se mantuvo a temperatura ambiente, monitoreando el potencial a circuito abierto empleando un multímetro.

### 3.5.2 Caracterización mediante curvas de polarización y potencia

Hay varios procedimientos disponibles para evaluar el desempeño de las CCMBs [Fan et al. 2008], tales como: espectroscopia de impedancia electroquímica, métodos de interrupción de corriente, máximo pico de potencia (MPP) y curva de polarización. En este trabajo, se seleccionaron los procedimientos de MPP y curvas de polarización para evaluar el desempeño de la celda de combustible béntica.

Así, cuando un sistema de CCMB está trabajando en condiciones estables, el voltaje de la CCMB ( $E_{CCMB}$ ) es una función de la carga ( $\Omega$ ), la celda fue estudiada cambiando la Resistencia externa del circuito ( $R_{ext}$ ) y su correspondiente voltaje ( $V$ ) fue registrado. Por cada pareja de  $\Omega$  y  $V$  obtenido, su respectiva corriente ( $I$ ) fue evaluada a partir de la ley de Ohm:

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

La curva de polarización de una CCMB se obtiene graficando el voltaje de la celda vs la corriente de la celda. A partir de una curva de polarización, puede obtenerse una curva de densidad de potencia, graficando la densidad de potencia vs la densidad de corriente, tomando en cuenta que la potencia de la celda ( $P_{CCMB}$ ) se define como:

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

Por lo tanto, el desafío ingenieril para aumentar la producción de potencia en una CCMB, es tener la caída más pequeña de voltaje a medida que aumenta la corriente. Esta condición experimental se localiza en el MPP en la curva de densidad de potencia parabólica. El voltaje a circuito abierto (OCV) es la máxima diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) que puede ser obtenida con una CCMB y éste es alcanzado en condiciones estables, cuando una resistencia (por ejemplo, un voltámetro de alta impedancia) es conectado entre el cátodo y

el ánodo. Bajo esta condición el tiempo de colonización bacteriana también es obtenido. Así mismo, la densidad de potencia de la CCMB en este estudio se normalizó al área del ánodo ( $mW m^{-2}$ ).

### **3.5.3 Determinación de la resistencia interna del sistema.**

Una vez que la CCMB desarrolló un voltaje estable, se realizó la caracterización del sistema, variando la  $R_{ext}$  en un intervalo de 50 a 10,000  $\Omega$ , empleando una resistencia variable (Marca: Potenciómetro de precisión "Bochen", Modelo: 17006, Características: 10 Kilo Ohms, 10 VUELTAS, 2 Watts).

La caída óhmica a través de la  $R_{ext}$  se midió a través de un multímetro (Marca: Multímetro Digital Escolar "Truper", Modelo: 10400) y la corriente de la celda fue evaluada a través de la ley de Ohm. Así se examinó el desempeño de la celda béntica.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Aclimatación de la Celda Béntica

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 Figura 4.1 muestra el tiempo de colonización bacteriana en función del voltaje (monitoreado a circuito abierto). Como se puede observar en la gráfica, el voltaje inicial de la celda fue de 0.7 V, disminuyendo a 0.55 V y manteniéndose los primeros 8 días  $\sim 0.6$  V; el día 9 la celda disminuyó el voltaje a 0.48 V, esto pudo deberse a que el dispositivo se cambió de ubicación, lo cual afectó el sistema, y requirió que éste se estabilizará. Los siguientes 20 días de operación, la celda alcanzó un voltaje estable de  $\sim 0.50$  V, y después de 32 días el potencial empezó a decaer rápidamente, probablemente debido a que la materia orgánica contenida en los sedimentos comenzó a agotarse.

Lo anterior indica, que aproximadamente a los 12 días la celda alcanza un voltaje estable, además, la cantidad de materia orgánica contenida de manera natural en los sedimentos, es suficiente para permitir que la celda béntica permanezca en operación por al menos 31 días.

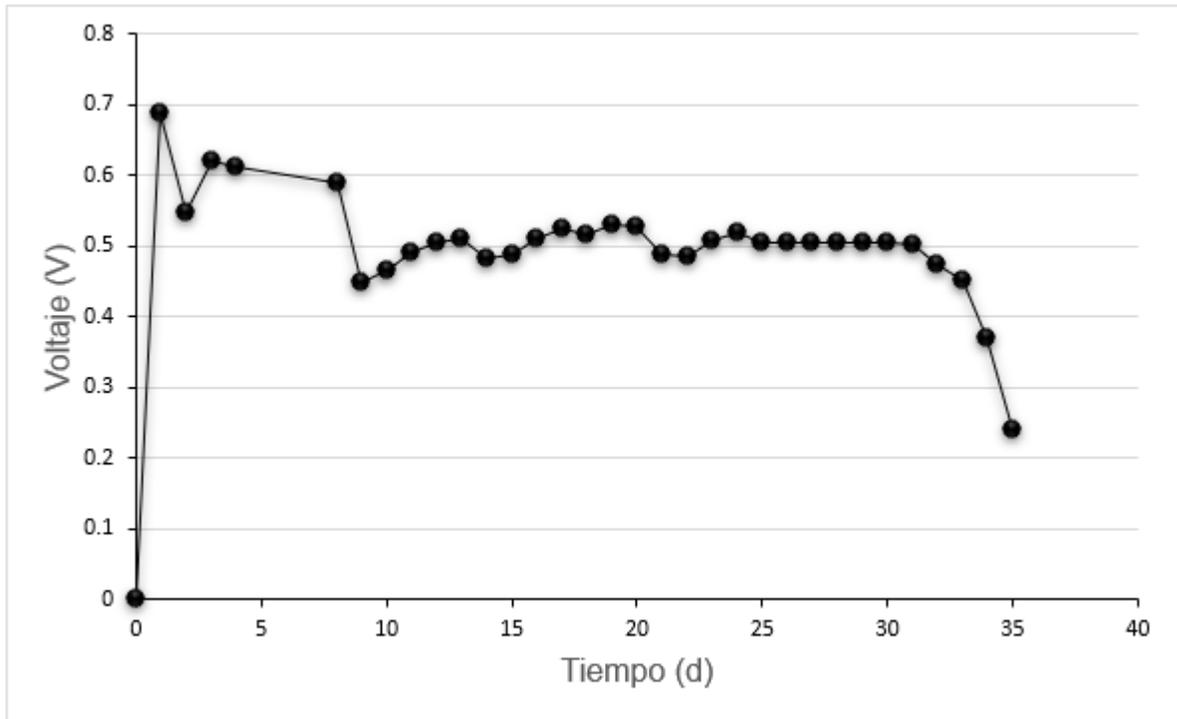


Figura 4.1 Colonización bacteriana de la celda béntica, catolito: agua pH 7. Voltaje medido a circuito abierto.

Fuente: Imagen propia

Para que la celda béntica continúe en operación, se le puede suministrar materia orgánica adicional, que en este caso no se realizó, y se dejó que la celda decayera a 0.2 V, una vez que está llegó hasta ese punto la celda se desmontó. En ambientes naturales, la celda béntica podría operar sin necesidad de requerir materia orgánica adicional, ya que esta se renueva de manera natural.

## 4.2 Voltaje como una función de la resistencia externa

Una vez que la CCMB desarrolló un voltaje estable en el periodo de aclimatación, que como puede observarse en la Figura 4.1 ocurrió aproximadamente a los 12 días de operación de

la celda, se inició con la adquisición de datos para la caracterización del sistema.

El OCV desarrollado en el período de aclimatación, se alcanzó bajo la condición de una resistencia muy grande. Cuando la resistencia se reduce, el voltaje disminuye, así el voltaje de la celda ( $E_{CCMB}$ ) es una función de la carga ( $\Omega$ ). Para estudiar la celda, se varió la resistencia externa en un intervalo de 150 a 10,000  $\Omega$ , el voltaje registrado para cada  $R_{ext}$  se muestra en la Figura 4.2.

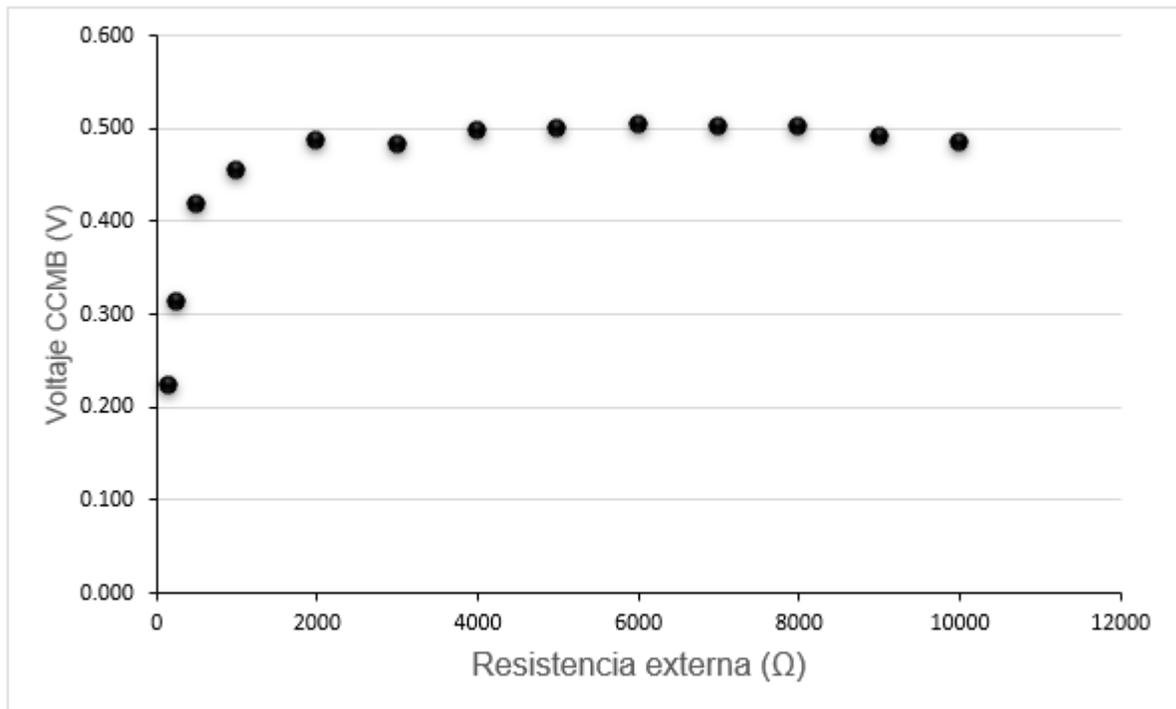


Figura 4.2 Voltaje de la CCMB como una función de la resistencia.

Fuente: Imagen propia

Para evaluar el desempeño de la celda béntica, 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

A partir de los datos de la gráfica anterior, se puede obtener la curva de polarización correspondiente. La Figura 4.3 muestra el voltaje en función a la corriente de la celda, expresada como densidad de corriente ( $i$ ):

$$i = (E_{CCMB}/R_{ext}A_{an}) \quad 4.1$$

Donde:

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

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

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

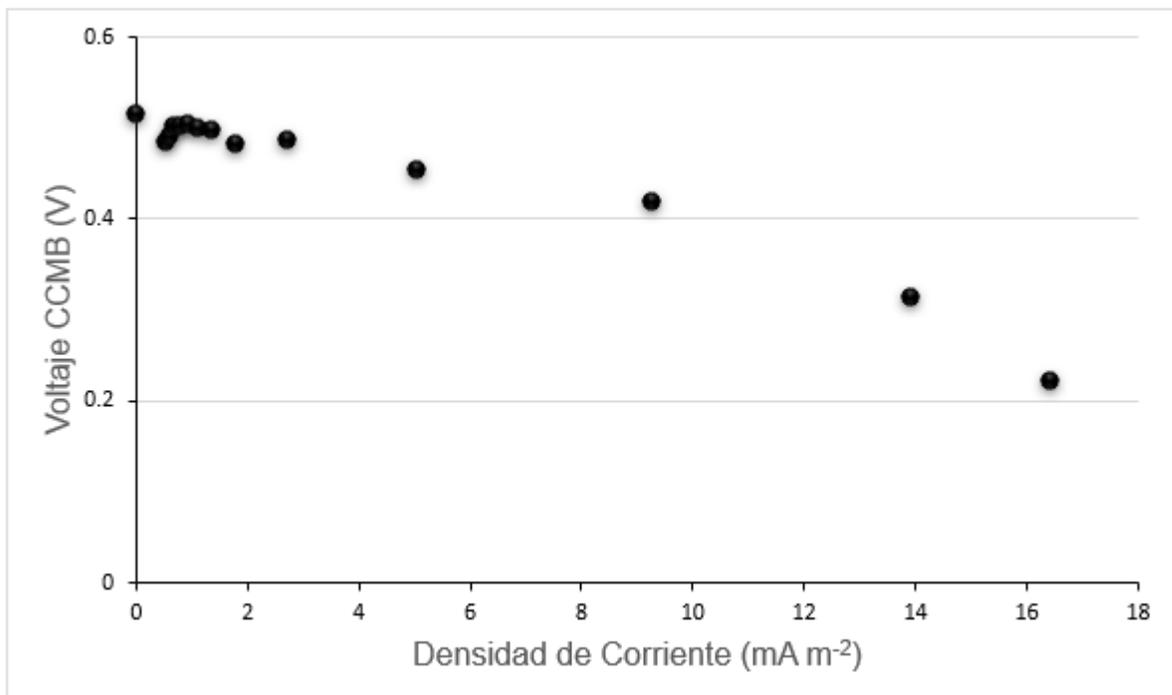


Figura 4.3 Voltaje de la CCMB expresado en función de la corriente

Fuente: Imagen propia

Como se puede observar en la Figura 4.3, la celda alcanza un OCV (Voltaje a circuito abierto) de 0.515 V. Se aprecia que el voltaje disminuye lentamente en potenciales mayores de 0.4 V, para después decaer de manera constante y casi lineal en un potencial de hasta 0.3 V, esta caída de voltaje puede atribuirse a pérdidas óhmicas en el sistema. Estas pérdidas son las más importantes en el diseño de una CCMB, ya que en esta región de la curva se ubica la máxima producción de potencia que alcanza una CCMB. Hay 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 a través del electrolito. Estas pérdidas pueden minimizarse, reduciendo la distancia entre los electrodos, aumentando la conductividad y asegurando un buen contacto entre el circuito y los electrodos [Clauwaert et al., 2008; Logan 2008]. Finalmente, en la Figura 4.3 se aprecia que la caída más rápida de voltaje ocurre a más altas densidades de corriente, y se atribuye a pérdidas por transporte de masa.

#### 4.3.1 Cálculo de la resistencia interna

Como se indicó en el capítulo 2, 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 (Figura 4.3), considerando los datos desde 0.49 V con una densidad de corriente de 1.38 mA/m<sup>2</sup> y hasta 0.41 V con una densidad de corriente de 9.29 mA/m<sup>2</sup>, los cuales se graficaron en la Figura 4.4. De la pendiente del segmento de línea recta, puede obtenerse la resistencia interna  $R_{int}$ .

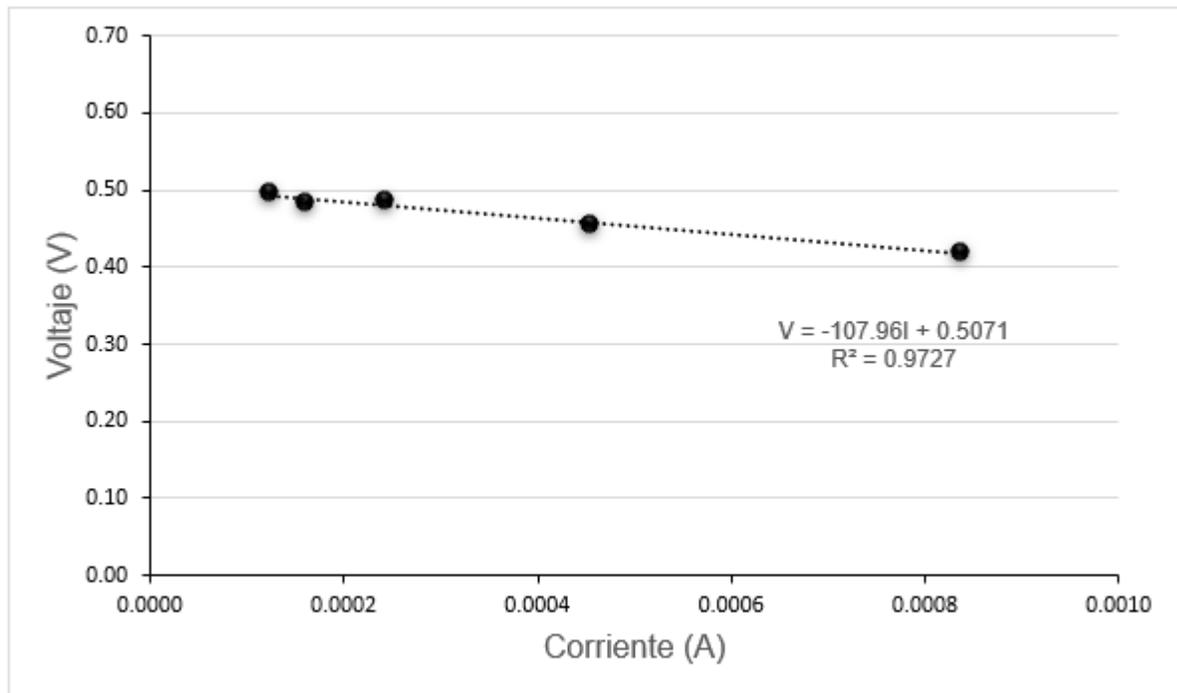


Figura 4.4 Resistencia interna de la celda de combustible microbiana béntica.

Fuente: Imagen propia

En la Tabla 4.1, se resumen los resultados de la resistencia interna de la CCMB.

Tabla 4. 1 Resumen de los parámetros obtenidos en la evaluación del desempeño de la CCMB; Ecuación de la recta,  $R^2$  = coeficiente de determinación lineal, resistencia interna  $R_{int}$ .

Ecuación de la recta	$R^2$	$R_{int} (\Omega)$
$V = -107.96 (I) + 0.5071$	0.9727	107.96

En la Tabla 4.1 puede apreciarse que la CCMB tuvo una resistencia interna 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  $\Omega$ .

#### 4.4 Producción de potencia en la celda béntica

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 (0.09 m<sup>2</sup>). La densidad de potencia ( $P_{\text{ánodo}}$ ) de una CCMB se expresa mediante la ecuación 4.2.

$$P_{\text{ÁNODO}} = E_{\text{CCMB}}^2 / A_{\text{an}} R_{\text{ext}} \quad 4.2$$

La generación de potencia en la celda béntica se ilustra en la Figura 4.5. Se obtuvo una máxima densidad de potencia de 4.35 mW m<sup>-2</sup>, con una corriente de 13.9 mA m<sup>-2</sup>, 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.

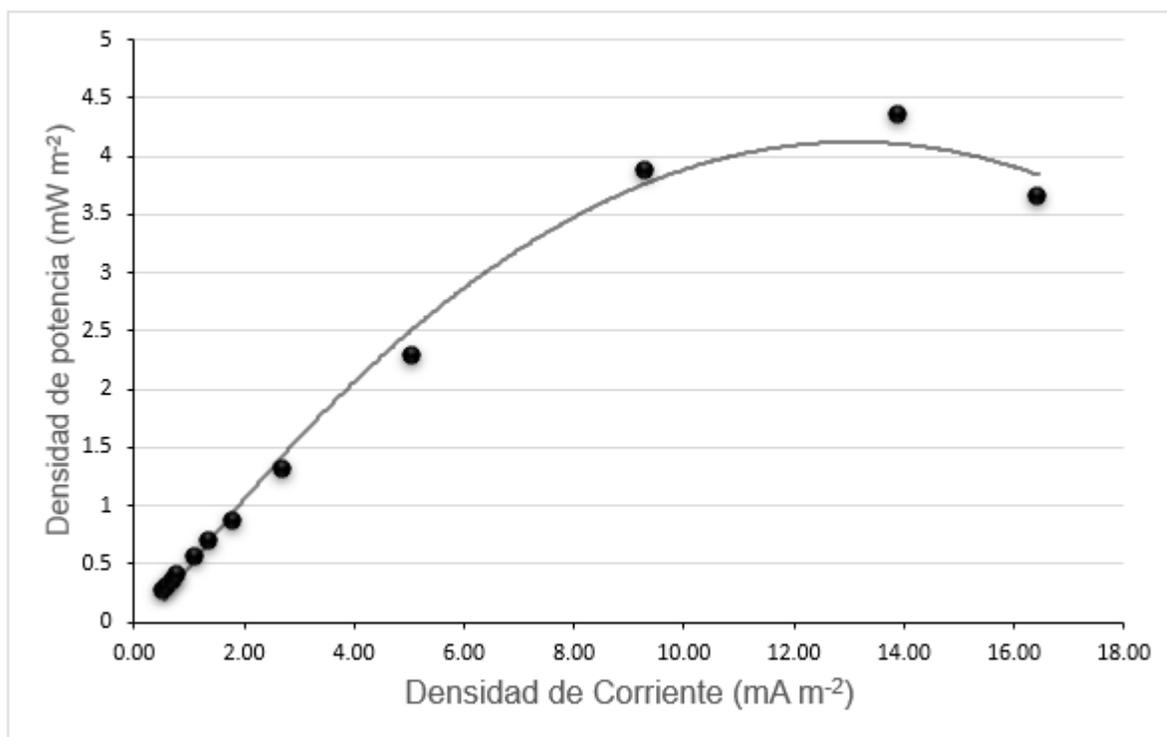


Figura 4.5 Producción de Potencia de la CCMB.

Fuente: Imagen propia

En la Tabla 4.1 se compara el resultado obtenido en este estudio, con otras investigaciones sobre este tipo de celdas.

Tabla 4.2 Producción de potencia de diferentes celdas bénticas.

Condiciones de operación	Electrodos (Ánodo/Cátodo)	Densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )	Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> )	Referencia
<b>Sedimentos de Jagüey</b>	<b>Fibra de carbón/ Acero inoxidable</b>	<b>4.35</b>	<b>13.91</b>	<b>Este estudio</b>
Sedimentos de río	Grafito/ Grafito	3.57	20	[Gatti,2016]
Sedimentos marinos	Malla de acero inoxidable (MAI) con carbón activado/ MAI con carbón activado y	94.1	857.5	[González, 2019]

carbón volcán				
Sedimentos de río	Tela de Carbón/Fibra de carbón	2.64	5.29	[Dávalos, 2019]

*Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede observar en la Tabla 4.1, González 2019 reportó una máxima densidad de potencia de 94.1 mW/m<sup>2</sup> empleando un stock de nueve celdas de combustible microbianas bénticas, así como sedimentos marinos y un material catalítico de carbón activado y carbón volcán en el cátodo manteniéndolo aireado.

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 mW/m<sup>2</sup> y 20 mA/m<sup>2</sup> de densidad de corriente. Por otra parte (Dávalos 2019), obtuvo una máxima densidad de potencia de 2.64 mW/m<sup>2</sup> con una densidad de corriente de 5.29 mA/m<sup>2</sup>, en una celda de combustible béntica utilizando sedimentos de un río. En este estudio se obtuvo una máxima densidad de potencia de 4.35 mW/m<sup>2</sup> con una densidad de corriente de 13.91 mA/m<sup>2</sup>, resultados que son más altos que los reportados por Gatti, 2016 y Dávalos 2019. Así que es factible utilizar sedimentos provenientes de un jagüey para la producción de electricidad.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

- Es factible construir una celda de combustible microbiana béntica a escala laboratorio, simulando las interfases sedimento-agua de un ambiente acuático. En este trabajo se emplearon sedimentos de un jagüey de la localidad de Ayala, Morelos, aprovechando la materia orgánica y los microorganismos contenidos en estos sedimentos para la producción de electricidad.
- La celda de combustible microbiana béntica se mantuvo en operación durante un período de 31 días, funcionando únicamente con la materia orgánica contenida en los sedimentos.
- La máxima densidad de corriente obtenida en este trabajo fue de  $4.35 \text{ mW/m}^2$  con una densidad de corriente de  $13.91 \text{ mA/m}^2$ , resultados que son comparables a los reportados en la literatura, con diferentes configuraciones de celdas de combustibles bénticas.
- En este estudio se demostró que es factible el uso de sedimentos de un jagüey para la producción de electricidad en una celda béntica, constituyendo una alternativa novedosa para la producción de energía de manera sustentable.

## REFERENCIAS

Aklujkar, M., Krushkal, J., DiBartolo, G., Lapidus, A., Land, M. L. and Lovley, D. R., 2009. "The genome sequence of *Geobacter metallireducens*: features of metabolism, physiology and regulation common and dissimilar to *Geobacter sulfurreducens*", *BMC Microbiology*, 9(1), p. 109.

Alzate Gaviria, L. M., González, K., Peraza, I., García, O., Domínguez Maldonado, J., Vázquez, J., Tzec-Simá, M. and Canto Canché, B., 2010. "Evaluación del desempeño e identificación de exoelectrógenos en dos tipos de celdas de combustible microbianas con diferente configuración en el ánodo", *Interciencia*, 35(1), pp. 19-25.

An, J., Kim, B., Nam, J., Ng, H. Y. and Chang, I. S., 2013. "Comparison in performance of sediment microbial fuel cells according to depth of embedded anode", *Bioresource Technology*, 127, pp. 138-142.

An, J., Lee, S., Ng, H. Y. and Chang, I. S., 2010. "Determination of effects of turbulence flow in a cathode environment on electricity generation using a tidal mud-based cylindrical-type sediment microbial fuel cell", *Journal of Environmental Management*, 91(12), pp. 2478-2482.

An, J., Nam, J., Kim, B., Lee, H., Kim, B. H. and Chang, I. S., 2015. "Performance variation according to anode-embedded orientation in a sediment microbial fuel cell employing a chessboard-like hundred-piece anode", *Bioresource Technology*, 190, pp. 175-181.

Bajracharya, S., ter Heijne, A., Dominguez Benetton, X., Vanbroekhoven, K., Buisman, C.

J., Strik, D. P. and Pant, D., 2015. "Carbon dioxide reduction by mixed and pure cultures in microbial electrosynthesis using an assembly of graphite felt and stainless steel as a cathode", *Bioresource Technology*, 195, pp. 14-24.

Bond, D. and Lovley, D., 2003. "Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes", *Applied and Environmental Microbiology*, 69(3), pp. 1548-1555.

Borole, A. P., Hamilton, C. Y., Vishnivetskaya, T., Leak, D. and Andras, C., 2009. "Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems", *Biochemical Engineering Journal*, 48(1), pp. 71-80.

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.

Bullen, R., Arnot, T., Lakeman, J. and Walsh, F., 2006. "Biofuel cells and their development", *Biosensors and Bioelectronics*, 21(11), pp. 2015-2045.

Cheng, S., Liu, H. and Logan, B., 2006. "Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure", *Electrochemistry Communications*, 8(3), pp. 489-494.

Choi, S., 2015. "Microscale microbial fuel cells: Advances and challenges", *Biosensors and Bioelectronics*, 69, pp. 8-25.

Clauwaert, P., Aelterman, P., Pham, T. H., De Schamphelaire, L., Carballa, M., Rabaey, K. and Verstraete, W., 2008. "Minimizing losses in bio-electrochemical systems: the road to

applications", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(6), pp. 901-913.

Cui, H., Du, L., Guo, P., Zhu, B. and Luong, J. H., 2015. "Controlled modification of carbon nanotubes and polyaniline on macroporous graphite felt for high-performance microbial fuel cell anode", *Journal of Power Sources*, 283, pp. 46-53.

Debabov, V., 2008. "Electricity from microorganisms", *Microbiology*, 77(2), pp. 123-131.

Dewan, A., Ay, S. U., Karim, M. N. and Beyenal, H., 2014. "Alternative power sources for remote sensors: A review", *Journal of Power Sources*, 245, pp. 129-143.

Du, Z., Li, H. and Gu, T., 2007. "A state-of-the-art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy", *Biotechnology Advances*, 25(5), pp. 464-482.

Dumas, C., Basseguy, R. and Bergel, A., 2008. "Electrochemical activity of *Geobacter sulfurreducens* biofilms on stainless steel anodes", *Electrochimica Acta*, 53(16), pp. 5235-5241.

Dumas, C., Mollica, A., Féron, D., Basseguy, R., Etcheverry, L. and Bergel, A., 2008. "Checking graphite and stainless anodes with an experimental model of marine microbial fuel cell", *Bioresource Technology*, 99(18), pp. 8887-8894.

Dong, H., Yu, H., Wang, X., Zhou, Q. and Feng, J., 2012. "A novel structure of scalable air-cathode without Nafion and Pt by rolling activated carbon and PTFE as catalyst layer in microbial fuel cells", *Water Research*, 46(17), pp. 5777-5787.

Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable de México. SENER – GTZ. 2009.

Erable, B., Lacroix, R., Etcheverry, L., Féron, D., Delia, M. and Bergel, A., 2013. "Marine floating microbial fuel cell involving aerobic biofilm on stainless steel cathodes", *Bioresource Technology*, 142, pp. 510-516.

Ewing, T., Ha, P. T. and Beyenal, H., 2017. "Evaluation of long-term performance of sediment microbial fuel cells and the role of natural resources", *Applied Energy*, 192, pp. 490-497.

Ewing, T., Ha, P. T., Babauta, J. T., Tang, N. T., Heo, D. and Beyenal, H., 2014. "Scale-up of sediment microbial fuel cells", *Journal of Power Sources*, 272, pp. 311-319.

Falcón, A.J., Lozano, E.N., Juárez, K., 2009. "Bioelectricidad". *BioTecnología*, Vol. 13 (3). 62-78 pp.

Fan, Y., Sharbrough, E., Liu, H., 2008. "Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*, 42 (21), 8101–8107.

Froelich, P., Klinkhammer, G., Bender, M., Luedtke, N., Heath, G., Cullen, D., Dauphin, P., Hammond, D., Hartman, B. and Maynard, V., 1979. "Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(7), pp. 1075-1090.

Fu, Y., Xu, Q., Zai, X., Liu, Y. and Lu, Z., 2014. "Low electrical potential anode modified with

Fe/ferric oxide and its application in marine benthic microbial fuel cell with higher voltage and power output", *Applied Surface Science*, 289, pp. 472-477.

Giorgi, L., Antolini, E., Pozio, A. and Passalacqua, E., 1998. "Influence of the PTFE content in the diffusion layer of low-Pt loading electrodes for polymer electrolyte fuel cells", *Electrochimica Acta*, 43(24), pp. 3675-3680.

González Santoló, J., 2009. "La generación eléctrica a partir de combustibles fósiles". *Divulgación*, pp.143-151.

Gregory, K., Bond, D. and Lovley, D., 2004. "Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration", *Environmental Microbiology*, 6(6), pp. 596-604.

Grey D., Garrick D., Blackmore D., Kelman J., Muller M., Sadoff C., 2013. "Water security in one blue planet: Twenty-first century policy challenges for science". *Philos Transact A Math Phys Eng Sci* 371.

Hernandez, M. and Newman, D., 2001. "Extracellular electron transfer", *Cellular and Molecular Life Sciences*, 58(11), pp. 1562-1571

Hidalgo, D., Sacco, A., Hernández, S. and Tommasi, T., 2015. "Electrochemical and impedance characterization of Microbial Fuel Cells based on 2D and 3D anodic electrodes working with seawater microorganisms under continuous operation", *Bioresource Technology*, 195, pp. 139-146.

Holmes, D. E., Chaudhuri, S. K., Nevin, K. P., Mehta, T., Methe, B. A., Liu, A., Ward, J. E.,

Woodard, T. L., Webster, J. and Lovley, D. R., 2006. "Microarray and genetic analysis of electron transfer to electrodes in *Geobacter sulfurreducens*", *Environmental Microbiology*, 8(10), pp. 1805-1815.

Hong, S., Kim, H. and Chung, T., 2010. "Alteration of sediment organic matter in sediment microbial fuel cells", *Environmental Pollution*, 158(1), pp. 185-191.

Hubenova, Y. and Mitov, M., 2015. "Extracellular electron transfer in yeast-based biofuel cells: A review", *Bioelectrochemistry*, 106, pp. 177-185.

Huang, L., Chai, X., Chen, G. and Logan, B. E., 2011. "Effect of Set Potential on Hexavalent Chromium Reduction and Electricity Generation from Biocathode Microbial Fuel Cells", *Environmental Science & Technology*, 45(11), pp. 5025-5031.

Huang, L., Regan, J. and Quan, X., 2011. "Electron transfer mechanisms, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells", *Bioresour. Technol.*, 102(1), pp. 316-323.

Huang, Y., He, Z., Kan, J., Manohar, A. K., Neelson, K. H. and Mansfeld, F., 2012. "Electricity generation from a floating microbial fuel cell", *Bioresour. Technol.*, 114, pp. 308-313.

Jiang Y.; Su M.; Zhang Y.; Zhan G.; Tao Y.; Li D., 2013. "Bioelectrochemical systems for simultaneously production of methane and acetate from carbon dioxide at relatively high rate", *International journal of hydrogen energy* 38, 3497-3502.

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.

Kumar, R., Singh, L., Wahid, Z. A. and Din, M. F. M., 2015. "Exoelectrogens in microbial fuel cells toward bioelectricity generation: a review", *International Journal of Energy Research*, 39(8), pp. 1048-1067.

Li, W., Sheng, G., Liu, X. and Yu, H., 2011. "Recent advances in the separators for microbial fuel cells", *Bioresource Technology*, 102(1), pp. 244-252.

Li, W. and Yu, H., 2015. "Stimulating sediment bioremediation with benthic microbial fuel cells", *Biotechnology Advances*, 33(1), pp. 1-12

Lin, B., Braster, M., van Breukelen, B. M., van Verseveld, H. W., Westerhoff, H. V. and Röling, W. F. M., 2005. "Geobacteraceae Community Composition Is Related to Hydrochemistry and Biodegradation in an Iron-Reducing Aquifer Polluted by a Neighboring Landfill", *Applied and Environmental Microbiology*, 71(10), pp. 5983-5991.

Liu, H. and Logan, B., 2004. "Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane", *Environmental Science & Technology*, 38(14), pp. 4040-4046.

Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B. E., 2004. "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell", *Environmental Science & Technology*, 38(7), pp. 2281-2285.

Logan, B., E., 2008. *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons Inc. New Jersey, USA.

Logan, B., 2009. "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells", *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), pp. 375-381.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Rabaey, K., 2006. "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology", *Environmental Science & Technology*, 40(17), pp. 5181-5192.

Logan, B. E. and Regan, J. M., 2006. "Microbial Fuel Cells—Challenges and Applications", *Environmental Science & Technology*, 40(17), pp. 5172-5180.

Lovley, D.R., 1991. "Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction.", *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 55(2), pp. 259-287.

Lovley D.R., 1993 "Dissimilatory metal reduction", *Applied and Environmental Microbiology*, vol 47, pp. 263–290.

Lovley, D.R., 2006. "Bug juice: harvesting electricity with microorganisms", *Nature Reviews Microbiology*, 4(7), pp. 497-508.

Lovley, D.R., 2008. "The microbe electric: conversion of organic matter to electricity", *Current Opinion in Biotechnology*, 19(6), pp. 564-571

Lovley, D.R., 2010. "Powering microbes with electricity: direct electron transfer from

electrodes to microbes", *Environmental Microbiology Reports*, 3(1), pp. 27-35.

Lovley, D. R., Fraga, J. L., Blunt-Harris, E. L., Hayes, L. A., Phillips, E. J. P. and Coates, J. D., 1998. "Humic Substances as a Mediator for Microbially Catalyzed Metal Reduction", *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 26(3), pp. 152-157.

Ma, M., You, S., Gong, X., Dai, Y., Zou, J. and Fu, H., 2015. "Silver/iron oxide/graphitic carbon composites as bacteriostatic catalysts for enhancing oxygen reduction in microbial fuel cells", *Journal of Power Sources*, 283, pp. 74-83.

Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J., 2009. "Brock. Biología de los microorganismos", (10th edición) *Editorial Pearson*.

Malvankar, N. and Lovley, D., 2014. "Microbial nanowires for bioenergy applications", *Current Opinion in Biotechnology*, 27, pp. 88-95.

Mook, W. T., Aroua, M. K. T., Chakrabarti, M. H., Noor, I. M., Irfan, M. F. and Low, C. T. J., 2013. "A review on the effect of bio-electrodes on denitrification and organic matter removal processes in bio-electrochemical systems", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(1), pp. 1-13.

Morris, J. and Jin, S., 2012. "Enhanced biodegradation of hydrocarbon-contaminated sediments using microbial fuel cells", *Journal of Hazardous Materials*, 213-214, pp. 474-477.

Navigant, R., 2011. ¿Qué Beneficios Tiene La Energía Eólica? | ACCIONA. [online] Acciona.com. Available at: <<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia->

eolica/>.

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.

Ozdemir, S., Buonomenna, M. and Drioli, E., 2006. "Catalytic polymeric membranes: Preparation and application", *Applied Catalysis A: General*, 307(2), pp. 167-183.

Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. and Vanbroekhoven, K., 2010. "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production", *Bioresource Technology*, 101(6), pp. 1533-1543.

Patil, S., Hägerhäll, C. and Gorton, L., 2012. "Electron transfer mechanisms between microorganisms and electrodes in bioelectrochemical systems", *Bioanalytical Reviews*, 4(2-4), pp. 159-192.

Phillips, E., Lovley, D. and Roden, E., 1993. "Composition of Non-Microbially Reducible Fe(III) in Aquatic Sediments", *Applied and Environmental Microbiology*, 59(8), pp. 2727-2729.

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.

Rabaey, K., 2010. "Bioelectrochemical Systems", *United Kingdom: IWA*.

Reguera, G., McCarthy, K. D., Mehta, T., Nicoll, J. S., Tuominen, M. T. and Lovley, D. R., 2005. "Extracellular electron transfer via microbial nanowires", *Nature*, 435(7045), pp. 1098-1101.

Reguera, G., Nevin, K. P., Nicoll, J. S., Covalla, S. F., Woodard, T. L. and Lovley, D. R., 2006. "Biofilm and Nanowire Production Leads to Increased Current in *Geobacter sulfurreducens* Fuel Cells", *Applied and Environmental Microbiology*, 72(11), pp. 7345-7348.

Reguera, G., Pollina, R. B., Nicoll, J. S. and Lovley, D. R., 2006. "Possible Nonconductive Role of *Geobacter sulfurreducens* Pilus Nanowires in Biofilm Formation", *Journal of Bacteriology*, 189(5), pp. 2125-2127.

Rabaey, K. and Verstraete, W., 2005. "Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation", *Trends in Biotechnology*, 23(6), pp. 291-298.

Reimers, C. E., Girguis, P., Stecher, H. A., Tender, L. M., Ryckelynck, N. and Whaling, P., 2006. "Microbial fuel cell energy from an ocean cold seep", *Geobiology*, 4(2), pp. 123-136.

Reimers, C. E., Tender, L. M., Fertig, S. and Wang, W., 2001. "Harvesting Energy from the Marine Sediment–Water Interface", *Environmental Science & Technology*, 35(1), pp. 192-195.

Revelo, D.M., Hurtado, N. H., Ruiz J. O., 2013. "Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica". *Información Tecnológica*. Vol. 24 (26). 17- 28 pp.

Rittmann, B., 2006. "Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology", *Trends in Biotechnology*, 24(6), pp. 261-266.

Rosenbaum, M., Aulenta, F., Villano, M. and Angenent, L. T., 2011. "Cathodes as electron donors for microbial metabolism: Which extracellular electron transfer mechanisms are involved?", *Bioresource Technology*, 102(1), pp. 324-333.

Ruiz, G., 2020. ¿Que Son Las Energías Limpias? - Erenovable.Com. [online] Erenovable.com. Available at: <<https://erenovable.com/energias-limpias/>>.

Scott, K., Cotlarciuc, I., Hall, D., Lakeman, J. B. and Browning, D., 2008. "Power from marine sediment fuel cells: the influence of anode material", *Journal of Applied Electrochemistry*, 38(9), pp. 1313-1319.

Shukla, A. K., Suresh, P., Berchmans, S., & Rajendran, A., 2004. "Biological fuel cells and their applications". *Curr. Sci*, 87(4), 455-468.

Snider, R. M., Strycharz-Glaven, S. M., Tsoi, S. D., Erickson, J. S. and Tender, L. M., 2012. "Long-range electron transport in *Geobacter sulfurreducens* biofilms is redox gradient-driven", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(38), pp. 15467-15472.

Song, Y., An, B., Shin, J. and Park, J., 2015. "Ethanolamine degradation and energy recovery using a single air-cathode microbial fuel cell with various separators", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, pp. 392-397.

Strycharz, S. M., Woodard, T. L., Johnson, J. P., Nevin, K. P., Sanford, R. A., Löffler, F. E. and Lovley, D. R., 2008. "Graphite Electrode as a Sole Electron Donor for Reductive Dechlorination of Tetrachlorethene by *Geobacter lovleyi*", *Applied and Environmental Microbiology*, 74(19), pp. 5943-5947.

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.

Szöllősi, A., Rezessy-Szabó, J. M., Hoschke, Á. and Nguyen, Q. D., 2015. "Novel method for screening microbes for application in microbial fuel cell", *Bioresource Technology*, 179, pp. 123-127.

Tender, L. M., Reimers, C. E., Stecher, H. A., Holmes, D. E., Bond, D. R., Lowy, D. A., Pilobello, K., Fertig, S. J. and Lovley, D. R., 2002. "Harnessing microbially generated power on the seafloor", *Nature Biotechnology*, 20(8), pp. 821-825.

Thomas, Y. R., Picot, M., Carer, A., Berder, O., Sentieys, O. and Barrière, F., 2013. "A single sediment-microbial fuel cell powering a wireless telecommunication system", *Journal of Power Sources*, 241, pp. 703-708.

Torres, C., 2014. "On the importance of identifying, characterizing, and predicting fundamental phenomena towards microbial electrochemistry applications", *Current Opinion in Biotechnology*, 27, pp. 107-114.

Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A. and Watanabe, K., 2016. "Sizes of Anode and

Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells", *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 06(01), pp. 10-15.

Wall, J. D. Harwood, C., and Demain, A., 2008. "Bioenergy". Washington, D.C: ASM Press.

Wall, J.D. and Krumholz, L.R., 2006. "Uranium Reduction". *Annual Review of Microbiology*, 60, 149-166.

Wang, A., Cheng, H., Ren, N., Cui, D., Lin, N. and Wu, W., 2011. "Sediment microbial fuel cell with floating biocathode for organic removal and energy recovery", *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 6(4), pp. 569-574.

Wang, C., Chen, W. and Huang, R., 2010. "Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), pp. 7217-7223.

Watanabe, K., 2008. "Recent Developments in Microbial Fuel Cell Technologies for Sustainable Bioenergy", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 106(6), pp. 528-536.

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.

Yan T.F., 1977. "Chemistry of Marine Sediments", *Ann Arbor Science Publishers, Inc.*

Zhang, F., Cheng, S., Pant, D., Bogaert, G. V. and Logan, B. E., 2009. "Power generation using an activated carbon and metal mesh cathode in a microbial fuel cell", *Electrochemistry Communications*, 11(11), pp. 2177-2179.

Zhang, X., He, W., Yang, W., Liu, J., Wang, Q., Liang, P., Huang, X. and Logan, B. E., 2016. "Diffusion layer characteristics for increasing the performance of activated carbon air cathodes in microbial fuel cells", *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(2), pp. 266-273.

Zhang, X., Pant, D., Zhang, F., Liu, J., He, W. and Logan, B. E., 2014. "Long-Term Performance of Chemically and Physically Modified Activated Carbons in Air Cathodes of Microbial Fuel Cells", *ChemElectroChem*, 1(11), pp. 1859-1866.

Zhang, F., Saito, T., Cheng, S., Hickner, M. A. and Logan, B. E., 2010.) "Microbial Fuel Cell Cathodes with Poly(dimethylsiloxane) Diffusion Layers Constructed around Stainless Steel Mesh Current Collectors", *Environmental Science & Technology*, 44(4), pp. 1490-1495.

Zhang, X., Xia, X., Ivanov, I., Huang, X., & Logan, B. E., 2014. "Enhanced activated carbon cathode performance for microbial fuel cell by blending carbon black", *Environmental science & technology*, 48(3), 2075-2081.

Zhou, Y., Yang, Y., Chen, M., Zhao, Z. and Jiang, H., 2014. "To improve the performance of sediment microbial fuel cell through amending colloidal iron oxyhydroxide into freshwater sediments", *Bioresource Technology*, 159, pp. 232-239.