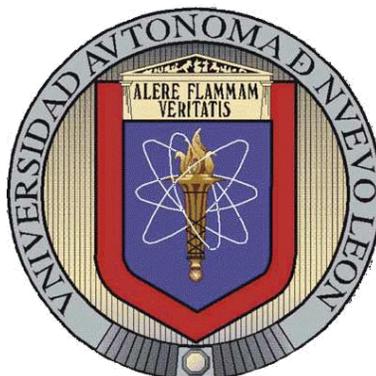


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



Desempeño de celdas de combustible microbianas basadas en aloe vera usando electrodos de SnS depositado sobre acero inoxidable 304

Por ING. NESTOR DAVID RODRIGUEZ REGALADO

Como requisito en tener grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Química de los Materiales.

Julio 2024



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS**

**Desempeño de celdas de combustible microbianas basadas en aloe
vera usando electrodos de SnS depositado sobre acero inoxidable 304**

Por ING. NESTOR DAVID RODRIGUEZ REGALADO

Como requisito en tener grado de Maestro en Ciencias con Orientación en
Química de los Materiales.

Julio 2024

**Desempeño de celdas de combustible microbianas basadas en aloe vera
usando electrodos de SnS depositados sobre acero inoxidable 304**

Los miembros del comité de tesis aprueban la tesis realizada por el alumno Néstor David Rodríguez Regalado, con matrícula 1460647, como opción al grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Química de los Materiales.

Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente

Presidente

Coordinadora del Posgrado Química de los Materiales

**Desempeño de celdas de combustible microbianas basadas en aloe vera
usando electrodos de SnS depositado sobre acero inoxidable 304**

Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente
Directora

Dra. Yolanda Peña Méndez
Codirectora

Dra. Edith Osorio de la Rosa
Codirectora

DEDICATORIA

A Dios

Por conocer y tener la
maravillosa oportunidad de
seguir vivo, por su amor infinito,
por ponerme a las personas en
mi camino para que se haga
realidad y sobre todo por
hacerme realidad el sueño de
lograr el título de la maestría.

A mi familia

Por su infinito amor incondicional y apoyo

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo de investigación en recibir financiación por:

Por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) mediante el proyecto titulado: **“Desempeño de celdas de combustible microbianas basadas en aloe vera usando electrodos de SnS depositado sobre acero inoxidable 304”**.

Por el apoyo brindado a la investigación científica de este trabajo por parte del Laboratorio de Materiales I de la UANL bajo la dirección de las Dras, Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente, Dra. Yolanda Peña Méndez y Dra. Edith Osorio de la Rosa.

ÁREA DE TRABAJO

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ciencias Químicas, U.A.N.L. bajo la dirección general de la Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente y Dra. Yolanda Peña Méndez.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente.

Coordinadora del Departamento del Posgrado de Materiales de la Facultad de Ciencias Químicas, UANL. Agradezco mucho la oportunidad que me ofreció en dar a conocer el posgrado en química de los materiales y por haber tenido la confianza de apoyarme durante todo el trayecto de la maestría. Además agradecer que jamás estuve solo en toda la maestría y realizar este proyecto de tesis que se realizó a cabo y sobre todo por enseñarme sus conocimientos.

A la Dra. Yolanda Peña Méndez.

Del Departamento de Materiales I de la Facultad de Ciencias Químicas, U.A.N.L. Quiero expresar mi agradecimiento en la oportunidad en dar este proyecto para poder realizarlo y que se diera a conocer para todo el mundo también por tenerme la paciencia necesaria en asesorarme, dirigirme y de haber tenido la confianza de apoyarme en la realización de esta tesis de maestría que jamás me dejó solo.

A la Dra. Edith Osorio de la Rosa.

Agradezco mucho la amistad, apoyo, estar al pendiente y por su ayuda en el desarrollo del presente trabajo y porque de alguna manera ha contribuido en la realización de este trabajo. Además, agradezco mucho la oportunidad en que me ofreció todo su apoyo, amistad, confianza y estar siempre disponible para poder realizar esta tesis de maestría.

A todo el personal del:

- ***Laboratorio de Materiales***
- ***Facultad de Ciencias Químicas***
- ***UANL***
- ***CONACYT CVU: 1145373***

TABLA DE CONTENIDO

Sección	Página
AGRADECIMIENTOS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE SIMBOLOS.....	xi
NOMENCLATURA.....	xii
FORMULAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEORICO.....	16
2.1 Tipos de CCM.....	17
2.2 Configuración CCM.....	17
2.3 Materiales empleados a CCM en plantas.....	18
2.3.1 Electroodos.....	18
2.3.2 Ánodo.....	19
2.3.3 Cátodo.....	19
2.4 Configuraciones CCM.....	20
2.5 Microorganismos.....	20
2.6 Biomasa.....	21

2.7 Tipos de plantas.....	21
2.7.1 Plantas del grupo C-3.....	22
2.7.2 Plantas del grupo C-4.....	23
2.7.3 Plantas del grupo CAM.....	23
2.7.4 Ciclo de Calvin.....	23
2.7.5 Ciclo de Krebs.....	23
2.7.6 Raíz.....	24
2.7.7 Tallo.....	24
2.7.8 Hojas.....	24
2.7.9 Flores.....	24
2.7.10 Semillas.....	24
2.7.11 Frutos.....	25
3. MATERIALES.....	26
3.1 Materiales.....	26
3.2 Métodos.....	26
3.2.1 Preparación del electrodo acero inoxidable 304.....	26
3.2.2 Preparación del depósito SnS.....	27
3.2.3 Caracterización de electrodos.....	27
3.2.4 Construcción de las CCM basadas en aloe vera.....	27
3.3 Técnicas de caracterización.....	28
3.3.1 Análisis Difracción de rayos X.....	28
3.3.2 Microscopía electrónica de barrido	29

3.3.3 Curva de polarización.....	30
3.3.3.1 Curva de polarización óhmica.....	31
3.3.3.2 Curva de polarización de concentración.....	31
3.3.4 Potencia.....	31
3.3.5 Tiempo de carga al sistema electroquímico.....	31
4. RESULTADOS.....	32
4.1 Caracterización de películas.....	32
4.1.1 Análisis de difracción de rayos X.....	32
4.1.2 Mediciones eléctricas de I y V de películas.....	33
4.1.3 Curvas de polarización de las mejores CCM.....	39
4.1.4 Potencia.....	41
4.2 Producción de energía.....	45
4.2.1 Voltaje eléctrico.....	45
4.2.2 Curvas de voltaje contra tiempo.....	45
4.2.3 DAC Adquisidor digital de señales en las CCM.....	45
4.2.4 Capacitor 15F a 5.5V en una CCM.....	46
4.2.5 Aplicación en dispositivos de bajo consumo.....	48
4.3 SEM de las CCM.....	49
5. CONCLUSIONES.....	52
6. REFERENCIAS.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla	PÁGINA
1. Tabla 1. Residuos generados para este proyecto.....	25
2. Tabla 2. Descripción de las CCM.....	35
3. Tabla 3. Resistencias utilizadas para generar las curvas de polarización..	40
4. Tabla 4. Valores de Voc cuando $I_{sc}=0$, y $V_{oc}=0$ para valores de I_{sc}	42
5. Tabla 5. Valores de Potencia de las CCM.....	44

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PAGINA
1. Figura 1 Configuración celda de combustible microbiana.....	17
2. Figura 2 Difracción de rayos X (XRD) planos de un cristal.....	29
3. Figura 3 Microscopía electrónica de barrido.....	30
4. Figura 4. XRD SnS depositado durante 9 h a 40°C.....	34
5. FIGURA 5 Medición voltaje de las CCM.....	37
6. FIGURA 6 Medición corriente de las CCM.....	38
7. FIGURA 7 Medición voltaje de las CCM.....	38
8. FIGURA 8 Medición corriente de las CCM.....	39
9. FIGURA 9 Curvas de polarización de las CCM de Geo y TA304... 41	
10. FIGURA 10 Curvas de polarización de las CCM de ASnS-4h-14a, ASnS-8h y ASnS-9h.....	41
11. FIGURA 11 Potencia de las CCM de Geo-15a y TA304-15b.....	43
12. FIGURA 12 Potencia de las CCM de ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h..	44
13. Figura 13 DAC Adquisidor de señales.....	45
14. Figura 14 Cosechador de energía convertidor-elevador Buck de 5V... 47	
15. Figura 15 Total voltaje de carga del capacitor.....	48
16. Figura 16 Energía almacenada de configuración CCM.....	49
17. Figura 17 Acero inoxidable 304.....	50
18. Figura 18 Deposito SnS.....	50
19. Figura 19 Bacterias en SnS.....	51

LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO

η

λ

θ

NOMENCLATURA

ONU – Organización de las naciones unidas

CCM – Celdas de combustible microbianas

CO₂ – Dióxido de carbono

HPLCMS – Cromatografía de líquidos de alta eficiencia acoplada a la espectrometría de masas

XRD – Difracción de rayos x

SnS – Sulfuro de estaño

LGEEPA – Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

FÓRMULAS

ECUACION	PAGINA
1. $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	20
2. $n\lambda = 2d_{hkl} \text{sen } \theta$	29

RESUMEN

Ing. Nestor David Rodríguez Regalado Fecha de graduación: Junio 2024

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Título de la investigación: Desempeño de celdas de combustible microbianas basadas en aloe vera usando electrodos de SnS depositado sobre acero inoxidable 304

Número de páginas:

Propósito y Métodos de estudio: Para el presente trabajo, se evaluó el desempeño de las celdas de combustible microbianas (CCM) mediante los microorganismos que convierten en electrodo al sustrato para lograr hacerlo biodegradable pasando a corriente eléctrica. En el presente trabajo se llevó a cabo la obtención de películas delgadas depositadas sobre acero inoxidable 304 con la técnica del depósito por baño químico (DBQ) a diferentes tiempos de 3 a 9 horas y se les dio tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h para su aplicación de dispositivos de bajo consumo.

Contribuciones y conclusiones: Se cultivó aloe-vera y se obtuvo energía limpia por cosecha de energía, las películas delgadas de SnS se obtuvieron por la técnica de depósito por baño químico y se dio un tratamiento térmico a cada a cada diferente sustrato. Las muestras se caracterizaron y se mostró la formación de cada del sustrato de interés. Se realizó la cosecha de energía durante 120 días obteniendo en la planta que tuvo la película de 4 h, 8h y 9h se obtuvieron de 0.7 V con corriente máxima de 2.5 mA. Para conexiones a dispositivos de bajo consumo la ASnS-9h fue con mayor voltaje de 0.8 V y en la planta en serie de ASnS-4, 8 y 9 se obtuvo de 1.1 V. Así mismo, se llevó a cabo un análisis de sus propiedades eléctricas para almacenamiento de energía se obtuvo valores de corriente máxima para la ASnS-9h de 6 J y en serie de 8.5 J, para esta generación de energía puede utilizarse para su aplicación en dispositivos de bajo consumo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de energía produce dióxido de carbono (CO₂) a causa de las actividades del ser humano que emite gases de efecto invernadero principalmente la quema de hidrocarburos. El suministro mundial de energía depende en gran medida de los combustibles fósiles, con carbón, petróleo y gas natural [1]. En 1960, el nivel atmosférico de dióxido de carbono ha aumentado constantemente. En 2022, los niveles de dióxido de carbono alcanzaron los 37,550 millones de toneladas. En 2023, los niveles de dióxido de carbono superaron las 421 partes por millón, comparando las 317 partes por millón que fueron registradas en 1960. Debido a lo anterior, hay aumento en la temperatura de la superficie terrestre y oceánica, en 2023 fue de 1.18 grados centígrados más cálida que el promedio del siglo XX. Los expertos advierten que la temperatura media global puede alcanzar los 1.5 grados centígrados en el corto plazo. Este calentamiento progresivo ha supuesto una aceleración del deshielo del casquete polar ártico y un creciente número de desastres naturales, con las repercusiones humanas y económicas que estos traen [2]. En México, es considerado como el segundo país de América Latina con mayor generación de CO₂, produciendo aproximadamente 407 millones de toneladas al año, cifras que representan alrededor del 1.2% de las emisiones globales y colocan al país en la posición número 15 en el ranking de emisiones del CO₂. Si bien México plantea su interés en aspectos ambientales y de sustentabilidad a partir de 1992, fue en 1997 cuando mediante la reforma a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente [LGEEPA] y la presentación de la primera comunicación nacional sobre cambio climático se advirtió y planteo el nuevo rol e involucramiento del gobierno en aspectos ambientales y de sustentabilidad. En 2015, México ratifica su apoyo al cambio climático participando en el acuerdo de París, comprometiéndose a reducir sus emisiones de carbono en 22.0% antes

del 2030 con respecto a su línea base de emisiones y tomando como punto de partida los datos del último inventario de emisiones disponible en ese momento hasta 2013 [3]. En 2014 se emitieron a nivel nacional, sin considerar a las fuentes móviles, alrededor de 23.3 millones de toneladas de contaminantes. En total, las fuentes naturales emitieron 51.5% del total de los contaminantes y las antropogénicas el 48.5% restante. En el caso de las emisiones de las fuentes naturales, el 86% correspondió a compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes de la vegetación y el restante 14% a óxidos de nitrógeno generados por la vegetación y la actividad microbiana del suelo. Los datos estadísticos muestran que los países como estados unidos dependían en promedio del 44% de los proveedores externos de energía en 1996 y del 55.1% de media en 2017 [4]. La quema de combustibles fósiles son insuficientes y producen una contaminación geológica peligrosa a lo largo de la extracción de energía. Para hacer frente a tales desafíos, la fusión activa de recursos de energía renovable con generación distribuida es la única forma de progresar en el futuro. El esquema de respuesta a la demanda y el almacenamiento de baterías también son esenciales para la generación de energía confiable y constante y para un uso eficiente. Se presenta el papel de la generación de energía renovable en la evolución de la generación distribuida. Además, se evalúa una evaluación comparativa de la optimización de la generación distribuida renovable basada en criterios de optimización y resultados mejorados para este enfoque futurista amigable con la atmósfera [5]. En los últimos años, varios países del mundo impulsan iniciativas para incluir en sus sistemas de generación recursos renovables no convencionales en reemplazo de la energía térmica convencional, como medida contra los efectos adversos del cambio climático, pero esas medidas suelen encontrar barreras o limitaciones para su implementación, por lo que el análisis de mecanismos de incentivos y la evaluación de la experiencia internacional es fundamental para continuar incorporando estas tecnologías [6-7]. En este sentido la bioenergía es un tipo de energía renovable que se produce a partir del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico, generalmente de las sustancias que constituyen

los seres vivos o sus restos y residuos. Sin embargo, la bioenergía y los sistemas de bioproductos dependen de grandes cantidades de materiales, productos químicos y recursos energéticos fósiles, y su producción no es completamente libre de dióxido de carbono [8]. Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos capaces de producir electricidad limpia mediante los microorganismos que se encuentran en los rizodepósitos provenientes del exudado [9].

Actualmente, la bioenergía es una energía renovable que se genera a partir de diferentes tipos de biomasa que son la lignina y la celulosa, ha sido la fuente de energía con mayor crecimiento en los últimos años, con esta energía es una de las opciones más prometedoras para sustituir a los combustibles fósiles [10-12]. En este contexto, las Celdas de Combustible Microbianas basadas en Plantas (CCM, por sus siglas en inglés Plant Microbial Fuel Cells) surgen como una tecnología innovadora que no solo contribuye a la producción de energía limpia sino también al tratamiento de aguas residuales y la remediación de suelos. Utilizando la sinergia entre plantas y microorganismos electroactivos, las CCM generan electricidad a partir de la descomposición de materia orgánica presente en la zona radicular de las plantas [13-15]. Este método presenta un enfoque sostenible y eficiente para la producción de energía, al tiempo que reduce la emisión de gases de efecto invernadero. Las CCM son sistemas complejos que integran varios componentes clave para su funcionamiento. Estas partes incluyen:

Ánodo: Aquí es donde los microorganismos exoelectrógenos que se clasifican de acuerdo a su forma son pseudomas y si no tienen forma se le conoce como micoide, residen y realizan la oxidación de los compuestos orgánicos, liberando electrones.

Cátodo: En esta área, los electrones se reúnen con los protones y un aceptor de electrones (generalmente oxígeno) para formar agua u otros compuestos [16-18].

Conexiones eléctricas externas: Permiten el flujo de electrones del ánodo al cátodo, generando una corriente eléctrica que se puede aprovechar

externamente. Sustrato y plantas: Las raíces de las plantas están inmersas en el sustrato, que está colonizado por microorganismos. Las plantas suministran exudados radiculares a los microbios, que los utilizan para generar energía eléctrica [19-21].

En algunas configuraciones la CCM presentan una membrana de intercambio protónico (PEM): Separa el ánodo y el cátodo, permitiendo el paso de iones, pero impidiendo el mezclado de los reactantes. Un elemento importante para optimizar la eficiencia de las CCM son los materiales de los electrodos. Por ejemplo, se ha reportado el uso de grafito como electrodo, debido a su conductividad y resistencia a la corrosión [22]. Carbón activado el cual se ha estudiado por su porosidad y superficie de área extensa, lo que puede facilitar la formación de biofilms microbianos y mejorar la transferencia de electrones [23]. Acero inoxidable el cual ha sido investigado por su durabilidad y coste relativamente bajo, aunque puede requerir modificaciones para mejorar su compatibilidad electroquímica [24].

Por lo que en el presente trabajo se investigó sobre la colección de energía utilizando acero inoxidable 304 depositando una película de SnS para aumentar su potencia y por consiguiente su eficiencia en la cosecha de energía.

1.1 Antecedentes

En 2018, Putranto *et al.* Reportaron varias mediciones y después de 5 días de observación, el voltaje no aumentó, reportaron que no hizo reacción con la urea fue hasta el quinto día que comenzó a verse los cambios. Los autores prepararon medios de siembra de arroz y medios de cultivo de microorganismos que se colocaron en macetas junto con las plantas de arroz. Después de eso, los dos electrodos de carbón (ánodo y cátodo) se colocaron dentro (diámetro = 20 cm; altura = 23 cm) y se cubrieron con tierra. El ánodo se colocó horizontalmente en el fondo de la maceta a 3 cm del fondo de la maceta, mientras que el cátodo se colocó verticalmente en el costado de la maceta, se ajustó a la distancia del ánodo con distancias de 4, 6 y 8 cm. Los

autores reportaron de 1 y 5 gramos de urea, donde la caída de voltaje ocurrió a una distancia de los electrodos de 6 cm, es decir, 27.9 y 26.75 mV respectivamente. Posteriormente, se comprobó el valor máximo del voltaje producido por el tratamiento de 10 gramos de fertilizante de urea y 6 cm de distancia entre electrodos su valor de voltaje eléctrico fue de 196 mV, con una corriente máxima de 0.78 mA y obtuvieron una potencia eléctrica máxima de 153.66 mW/cm². Los autores reportaron que el material de las plantas de arroz aumentará el voltaje eléctrico a 700 mV en comparación con las plantas de arroz sin fertilizante que solo alcanzó un voltaje máximo de 390 mV, dando no un buen rendimiento en la celda de combustible microbiana [57].

En 2019, Sindhuja *et al.* Realizaron síntesis de óxido de manganeso, y obtuvieron resultados electroquímicos de 24 hasta 576 horas con tres resistencias, dos capacitancias y un elemento de fase constante. Los autores reportaron voltajes de caídas por los electrodos dando valores de 125 mV, en el diagrama de Nyquist y el circuito equivalente correspondieron para entender el transporte masivo, el transporte de carga y el fenómeno óhmico que ocurre en PMFC. En UV-VIS, los picos de absorbancia en 312, 506, 525, 545 y 566 nm corresponden a la solución acuosa del óxido de manganeso [58].

En 2019, Liew *et al.* Prepararon óxido de grafeno con una membrana hecha de éter-poliéter sulfonado cetona y óxido de grafeno dopado con plata-óxido de grafeno éter-poliéter sulfonado cetona, obtuvieron una conductividad de protones, baja permeabilidad al oxígeno. Los autores reportaron que el voltaje fue alcanzado de 620 a 650 mV para los sistemas de celdas de combustible microbiana y una potencia máxima de 896 mW/m² con la membrana de óxido de grafeno dopado con plata y óxido de grafeno éter-poliéter sulfonado. Los autores reportaron la celda de combustible microbiana con la plata operando después de 100 días. Los autores reportaron las imágenes TEM del material mostraron una sola capa de óxido de grafeno, reportaron que se debió al proceso de secado durante la reacción de preparación de la muestra y observaron las partículas de

plata distribuidas uniformemente en la superficie del óxido de grafeno, y el tamaño de las partículas de plata depositadas fueron menores a 10 nm [52].

En 2020, Cahyani *et al.* Reportaron la síntesis de grafito como materiales anódico y catódico para el rendimiento de almacenamiento de energía. Los autores reportaron una celda de combustible microbiana, analizaron los valores electroquímicos y obtuvieron curvas de polarización y densidad de potencia variando la resistencia externa a partir de 9000 Ω para determinar los voltajes. Posteriormente, los autores reportaron que tuvieron 14.52 W/m². No obstante, los electrodos fluían del ánodo al cátodo mientras transportaban protones, disminuyó el efecto de producción de electricidad causado por exceso de acidez en el ánodo o exceso de alcalinidad en el cátodo y la producción bioeléctrica fue de 590 mV [61].

En 2022, Apollon *et al.* Eligieron una celda microbiana sin electrodo y otra con carbón, para comparar cual daba mejor resultados las clasificaron como planta-MFC y C-MFC. Los autores reportaron que tuvieron menor voltaje en la son electrodo de carbón. Los autores reportaron los resultados del estudio han indicado que la planta-MFC, fue más eficaz y logró una generación de bioelectricidad más alta que la C-MFC. Los autores reportaron que la tensión máxima alcanzó con planta-MFC y fue de 850 mV (0.85 V), mientras que C-MFC alcanzó una tensión máxima de 762 mV (0.772 V) [24]

En 2022, Ashmath *et al.* Reportaron la síntesis de nanopartículas de cobalto haciendo por mecano-síntesis en carbono dopados N y S como material anódico de rendimiento para el almacenamiento de energía. Los autores reportaron una celda de combustible microbiana doble cámara utilizando una membrana nafion 117 para en el flujo de electrones. La reacción se llevó acabo de estado sólido entre acetato de zinc y 2-aminotiazol, tuvieron como resultado con un potencial de 0.63 V y mostró estabilidad después de 100 ciclos de potencial. Las imágenes por SEM mostraron una morfología esférica del carbono derivado de la síntesis

de cobalto y esto confirmó la presencia de C, N, O, S y Co en la muestra. Posteriormente, confirmaron la presencia de N y S indicando el dopaje exitoso de N y S en la matriz de carbono. Los autores realizaron el análisis en el potencial y aumentó lentamente a un máximo de 533 mV, el voltaje se mantuvo constante durante aproximadamente 15 horas e indicaron un voltaje máximo [49].

En 2023, Azri *et al.* Seleccionaron una planta que se llama "*Chlorophytum sp*" o mejor conocido como planta de araña utilizando grafito y sustratos de acero 436 y 316 para el rendimiento, almacenamiento de energía y capacidad de adaptación como electrodos en la CCM. Los autores reportaron que la planta de araña tiene la capacidad de crecer su energía mediante la luz sin embargo por las noches disminuye, sus condiciones son que la luz y temperatura no son estables. La reacción se llevó a cabo en una solución de acetato de clorofila como electrolito, en las soluciones de burbujeo con nitrógeno duró 20 minutos para mantener los microorganismos anaeróbicos vivos y prevenir la oxidación aeróbica en los electrodos en condiciones de 30 °C. Los autores realizaron análisis por diferencia de potencial eléctrico a circuito abierto (OCV), comparando la presencia y ausencia de plantas en ambos electrodos durante 120 días en un tiempo de 11 am a 15:00 pm, que corresponde al tiempo de máxima radiación solar. Los autores reportaron que las mediciones después de 80 días las tensiones parecen más estables para los aceros, y el voltaje fue registrado de 110mV, por las bacterias electroquímicamente activas mediante exudados al sustrato. Posteriormente, se hicieron los estudios electroquímicos para saber que material responde mejor en densidad de corriente para estimular los microorganismos. Se llevó a cabo electrodos de grafito y acero inoxidable 436 y 316 en un suministro de celda electroquímica con una solución de acetato de clorofila. Los autores reportaron los electrodos estaban polarizados a 30.155 V/SCE, el pH en el ánodo disminuyó de 6.9 a 6.5 que se obtuvo en la densidad de corriente para grafito de 0.35mW/m² y acero inoxidable de 1063 mW/m² en CCM, lo que corresponde a una eficiencia coulomb de 24% para grafito y 32% para los electrodos [41].

1.2 Análisis Crítico

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones para optimizar los materiales de los electrodos, tanto el ánodo como el cátodo, y explorar diferentes tipos de plantas para maximizar la producción de energía. Por ejemplo, las plantas empleadas en CCM, como el maíz, *Codiaeum variegatum* y la *Stevia rebaudiana*, tienen un impacto directo en la eficiencia de estas. El maíz, siendo una planta C4, es altamente eficaz en la conversión de energía solar en biomasa, lo cual es crítico dado que la biomasa radicular provee los sustratos necesarios para los microorganismos exoelectrógenos en el ánodo. Este tipo de fotosíntesis permite una producción energética de hasta 0.5 W/m^2 [25].

Codiaeum variegatum es una planta C3 la cual genera un voltaje máximo de 900mV en condiciones al exterior resaltando que la cosecha de energía mejora la respiración heterotrófica del suelo, la *Stevia rebaudiana* ha mostrado generar una tensión máxima de 850 mV en condiciones experimentales, subrayando la importancia de la fotosíntesis CAM en ambientes menos húmedos y su capacidad para sostener la actividad microbiana incluso en condiciones de estrés hídrico [26].

En cuanto a los materiales del electrodo, la innovación en el diseño y composición de estos componentes ha llevado a mejoras significativas en la eficiencia de las CCM. El uso de grafeno como ánodo ha mejorado la transferencia de electrones gracias a su alta conductividad y gran superficie específica, alcanzando una producción energética de hasta 0.75 W/m^2 , como se destaca en el estudio de Li et al. (2019). Además, el uso de la planta Aloe Vera planta CAM en combinación con óxido de plata como cátodo ha mostrado ser efectivo por su buena catalización del oxígeno, mejorando la eficiencia de la PMFC y alcanzando un rendimiento energético significativo de 11.2 mW/m^2 [27].

Además, Fan y Feng construye una CCM utilizando *scindapsus aureus* y como electrodos describen el uso de fieltro de carbono modificado con polianilina

(PANI) y alginato de sodio (SA) como ánodo en CCM para mejorar la remediación de suelos contaminados con cromo y la generación de energía. El estudio revela que los ánodos modificados con PANI-SA aumentaron significativamente la tasa de remoción de cromo hexavalente y mejoraron la generación de energía, alcanzando un voltaje estable de 5.25 Mv [28].

Estos hallazgos sugieren que una estrategia combinada de selección adecuada de la planta y optimización del material del electrodo puede conducir a sistemas de CCM más eficientes y sostenibles, capaces de integrarse eficazmente en aplicaciones de remediación ambiental y generación de energía renovable.

En este trabajo de investigación se llevaron a cabo de electrodos de SnS y acero inoxidable 304 en conjunto con el uso de Aloe Vera.

1.3 Aportación Científica

El SnS depositado sobre acero inoxidable 304 utilizado como electrodo en CCM incrementa su desempeño y tiempo de vida posibilitando brindar autonomía energética a diversos dispositivos electrónicos de bajo consumo.

1.4 Hipótesis

CCM a base del Aloe vera y electrodo de SnS sobre acero inoxidable 304, obtenido por baño químico, debe mostrar un mayor voltaje y estabilidad para energizar dispositivos en el rendimiento de energía.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar el desempeño de celdas combustible microbianas basadas en Aloe Vera usando electrodos de SnS depositado sobre acero inoxidable 304.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Sintetizar SnS por baño químico sobre acero inoxidable 304.
2. Aplicar tratamiento térmico al acero inoxidable 304.
3. Construir y evaluar el desempeño de una CCM, con plantas Aloe vera, y electrodos SnS depositado acero inoxidable 304.
4. Medir el rendimiento de una CCM basada en Aloe vera con electrodos de SnS sobre acero inoxidable 304.
5. Caracterizar los electrodos usando resistencias para determinar la curva de polarización y potencia.
6. Caracterizar el material SnS por SEM y XRD.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

A principios del siglo XXI han sido estudiados los microorganismos para generar electricidad [29], con esto, se ha logrado un avance para reducir parte de la demanda eléctrica utilizando los hidrocarburos. Los microorganismos obtienen energía y nutrientes mediante la realización de la fotosíntesis, la descomposición de organismos muertos y de desechos o la descomposición de compuestos químicos. Las geobacterias o conocido como “Geobacter”, son capaces de transformar internamente energía química a energía eléctrica, transfiriendo el flujo de los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos (celulosa y lignina) a los electrodos y construir una celda de combustible microbiana (CCM), tienen capacidad que hace útil en la biorremediación para oxidar [30]. Existe para la generación de energía en las plantas conocidas como proteobacterias, son geobacterias su aplicación es importante para la fijación de nitrógeno en varios tipos de plantas CAM, oxidando amonio para producir nitrito, un producto químico importante para la función de las plantas, se encuentran en muestras ambientales como en el suelo, sedimentos de agua dulce y sedimentos marinos anóxicos. El propósito no es el de competir con las tecnologías presentes que se encuentran hoy en día, con esto para generar electricidad a gran escala, más bien es de tratar de obtener durante este proceso un producto de valor agregado [31]. Es decir, no solo para el tema sustentabilidad, más bien como un proceso que propone que la materia orgánica puede producir energía limpia. En ciertas condiciones adecuadas para el desarrollo tecnológico, este tipo de proceso puede no solamente ser utilizado a gran escala de una región o industrial, esto también sería factible en ser instalado en comunidades habitacionales hasta en comunidades dispersas o aisladas del mundo [32]. Se sabe que para la generación de energía por este medio se han desarrollado las CCM, propone el tratamiento biológico de los microorganismos para la producción de energía eléctrica limpia. Este tipo de dispositivo se define como

funcionamiento de las celdas de combustible microbianas (CCM), se realiza los cálculos que genera la planta para producir electricidad limpia mediante los microorganismos y proveer a un sistema eléctrico residencial o industrial. La CCM es un tipo de bio-energía de producción de microorganismos (llamado exoelectrógenas) para producir energía. Estos microorganismos transforman un desarrollo biodegradable (bio-combustible) en electricidad limpia. Esta tecnología presenta ciertas ventajas sobre formas de generar energía a partir del compuesto orgánico en los microorganismos. En este caso [33]:

- Los iones al sustrato producen electricidad para tener altas eficiencias.
- Tienen eficiencia a altas temperaturas, ambiente e incluso a bajas temperaturas por ser una planta tipo CAM.
- Su potencial y configuración es aplicado en áreas rurales.
- Involucra un proceso anaerobio, debido a la biomasa no genera tanto esfuerzo para producir a comparación de otras tecnologías que resultan ser anaerobias.

2.1 Tipos de celdas de combustible microbianas

Existen tipos de celdas de combustible microbianas de las cuales las más que se usan son las de doble cámara en su uso son de nivel laboratorio.

2.2 Configuración de una celda de combustible microbiana

Se presentan y discuten los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura y la función. La celda de combustible microbiana tiene 3 partes importantes: los electrones, la membrana selectora de protones o medidor y el cuerpo o estructura de la celda [34]. Convierte un sustrato bioagradable directamente a electricidad, esto se consigue cuando las bacterias, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donante (la materia orgánica presente en la lignina o biomasa) a un aceptor de electrones (electrodo), tal como se observa en la figura 1.

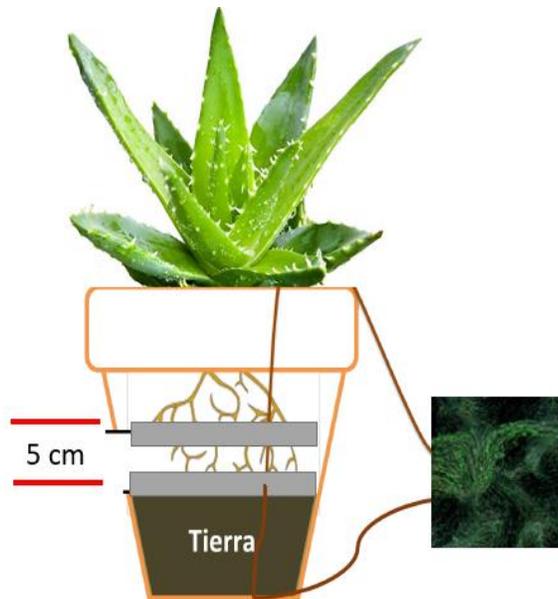


Figura 1 Configuración celda de combustible microbiana.

2.3 Materiales empleados a celdas de combustibles microbianas basadas en plantas

Actualmente, se investigan y seleccionan los materiales apropiados; el ánodo, el cátodo, la membrana, es uno de los desafíos clave para aplicar celdas de combustible microbianas. Los materiales específicos para cada compartimiento pueden afectar a la potencia y a la eficiencia eléctrica [35-37]. En las investigaciones de los científicos, mejoran que los costos puedan reducir los materiales, sobre todo de los electrodos, mientras que otras investigaciones dan importancia al costo de la construcción y operación del dispositivo, a generar altas energías, para compensar el costo de la electricidad.

2.3.1 Electrodo

Los electrodos son materiales para la determinación del desempeño y costo de las CCM. La configuración sigue siendo el mayor reto para convertir a las CCM en una tecnología rentable y escalable con menor costo [38]. Estos últimos 10 años, los electrodos son investigados, se pueden clasificar en dos principales grupos; bio-electrodos (bio-ánodo y bio-cátodo) y electrodos químicos (cátodos en fase acuosa), dependiendo si se emplea microorganismos como catalizadores

[39]. El tipo de electrodo, su material base debe ser conductor, con una buena estabilidad química, alta resistencia al esfuerzo mecánico, y que no sea de mayor costo para producción. Estas condiciones, son cumplidas generalmente por materiales como los bio-electrodos no sólo como materiales conductores, como soportes para el crecimiento de la biomasa. Algunas otras características esenciales para asegurar una alta actividad bio-catalítica son que los materiales presenten una alta rugosidad, buena bio-compatibilidad, y un flujo de electrones eficiente entre los microorganismos en la superficie del electrodo [40-42].

2.3.2 Ánodo

El ánodo es uno de los componentes esenciales de las CCM, junto con el cátodo y el electrolito. Los microorganismos generan la oxidación del sustrato y liberan electrones [43]. La zona donde se ubica el electrodo, se conoce como: cámara (o zona) anódica, es libre de oxígeno y hace su función en la generación de energía eléctrica. El oxígeno actúa como receptor de electrones en el proceso reducción microbiana antes que el electrodo, resultando menor energía eléctrica generada. Los materiales más empleados como ánodos en las CCM, se encuentran los de metal y de carbón [44]. Permiten encontrar diferentes rangos de costos de los materiales, conductividad y bio-compatibilidades.

2.3.3 Cátodo

Las celdas de combustible microbianas, el flujo de electrones que llegan al cátodo a través de un circuito externo (de material conductor no corrosivo), se combinan con los protones, se transportan en el ánodo a través de una membrana, y con el oxígeno que se encuentra presente en el área del cátodo. Se encuentran oxidantes químicos naturales diferentes al oxígeno, y es una opción económica debido que requiere regeneración natural por los microorganismos enzimáticos y no representa ninguna toxicidad para la biomasa. El desempeño de las celdas de combustible microbianas, la mayoría de materiales utilizados como ánodo pueden ser empleados también como cátodos, y estos pueden ser: cátodos expuestos al aire, en fase acuosa, y bio-cátodos [45-47].

2.4 Configuraciones CCM

Los investigadores desarrollan diseños y configuraciones de CCM para mejorar la potencia que se genera y la eficiencia que se obtiene. Existen celdas de combustible microbianas de una sola cámara, celdas de combustible microbianas de dos cámaras, celdas de combustible microbianas tubulares, celdas de combustible microbianas de sedimentos y acondicionadas en humedales [48]. Sin importar la configuración que se escoja, el funcionamiento sigue siendo el mismo.

2.5 Microorganismos

Los microorganismos pueden producir electricidad para la producción de energía, haciendo el sustrato la oxidación que la materia orgánica sea muy eficiente. Las reacciones microbiológicas forman un rango amplio de temperaturas, dependiendo de la tolerancia de los microorganismos, pudiendo ser desde temperaturas bajas, moderadas y altas, soportan los microorganismos psicrófilos y oxalacetato [49]. Las CCM han empleado cultivos de microorganismos puros o mixtos. Han demostrado una alta eficiencia eléctrica, de electrones transferidos al ánodo y el total de electrones producidos durante la oxidación microbiana, la habilidad para generar energía e incrementar el contacto físico microorganismo al ánodo. Se sabe que pueden ser en algunos casos requieren de mediadores redox exógenos.

Cuando los microorganismos metabolizan el flujo de electrones para proveerse de energía, están aprovechando la energía de la oxidación de sustancias ricas energéticamente (ricas en electrones), de los carbohidratos, por ejemplo, en reacciones como se muestra en la ecuación química 1 [50-52]:



En el catabolismo microbiano los sustratos como los rizodepositos se oxidan inicialmente en ausencia de oxígeno cuando sus electrones son liberados por

reacciones enzimáticas. Estos electrones son conservados como una fuente de energía que pasa a reducirse, y es en este estado que son usados para dar pie a reacciones que provean de energía a los rizodepositos para su crecimiento, por medio de reacciones biosintéticas [53].

2.6 Biomasa

Las CCM se considera una tecnología muy sustentable, es importante para cualquier proceso microbiológico, la generación nace del nutriente como su fuente de energía. Con la eficiencia y menor costo de producción de CCM, es convertir los desechos orgánicos de la biomasa a energía y dependerá de las características y componentes del material. El sustrato no sólo contribuirá en la composición de los microorganismos que están en el ánodo, además también contribuirán en el desempeño de las CCM en términos de potencia y de eficiencia energética [54].

2.7 Tipos de plantas

Las plantas que son parte de la biomasa son los seres vivos que se clasifican de acuerdo a los mecanismos que producen del reino vegetal o *phylum plantae*. Se conoce el mecanismo como: organismos autótrofos, que tienen la capacidad de movimiento en el rizodepósito que genera compuestos principalmente de lignina y celulosa. Las plantas producen energía usando de manera eficiente como: luz solar, agua y dióxido de carbono (CO₂) mediante una reacción llamada fotoquímica y bioquímica; para este proceso se conoce como fotosíntesis que tienen una producción generada por varios compuestos orgánicos y esto necesita la planta para liberar oxígeno (O₂) [55]. La fotosíntesis su proceso es tedioso que genera una fase luminosa y una fase oscura. La primera fase genera energía muy luminosa y se transforma en energía química, mientras que la fase oscura su objetivo es la síntesis de rizodepósitos en el proceso de CO₂ combinan con la energía química que se genera en la primera fase. La segunda fase genera oscuridad, debido a diferentes condiciones ambientales para las plantas que han evolucionado y desarrollado adaptaciones metabólicas y anatómicas para hacer

un uso eficiente en la biomasa y así optimizar la velocidad de asimilación de CO₂ para mejorar la síntesis de composiciones químicas [56-58]. Hay tres tipos de plantas que se encuentran clasificadas de acuerdo a como genera los mecanismos de la fotosíntesis, el grupo más antiguo es el de plantas de metabolismo fotosintético C₃, seguida de las plantas C₄ y, finalmente las plantas CAM [59]. Dependiendo del tipo de planta, se pueden clasificar en planta: **C-3, C-4 y CAM.**

2.7.1 Plantas del grupo C-3: Representa alrededor del 90 % de las plantas del mundo y la mayoría de los cultivos tienen mecanismo el ciclo de Calvin. En algunos ejemplos de cultivos de mecanismo C-3 son: dos moléculas del ácido de 3 carbonos, 3-fosfoglicérico. Tienen la mayor parte de la actividad, pero su rol fotosintético no está aclarado ya que el ciclo Calvin es una molécula de dióxido de carbono, y las plantas que utilizan solo este mecanismo de fijación de carbono. El resultado es una unidad de ataque que crea agujeros en la membrana de las bacterias, destruyéndolas se adhiere a los microorganismos y se destruyen [60].

2.7.2 Plantas del grupo C-4: Sus reacciones dependen de la luz y el ciclo Krebs, que son producidas en células del mesófilo (conocido como un tejido tipo esponja en su centro de la hoja) son una serie de reacción enzimática que se interconecta y descompone la glucosa y otro sustrato metabólico en dióxido de carbono (CO₂), que son liberados los electrones y protones en el proceso de la planta, mientras que en el ciclo de Calvin ocurren en células especiales alrededor de las venas de la hoja. Estas células se llaman células del haz vascular [61].

2.7.3 Plantas del grupo CAM: Este tipo de plantas se adaptada a un ambiente seco, utiliza un metabolismo que es ácido en las crasuláceas (CAM), esto para reducir un mínimo en la fotorrespiración con esto hacen la unión de ambos ciclos de Calvin y de Krebs. No se separa en continuación con la reacción que depende de la luz y el uso de en el ciclo de Calvin y de Krebs en el espacio, las plantas CAM separa este proceso en el tiempo [62]. Durante la noche, abren sus estomas

para que se difunda en todas las hojas y en su tallo produciendo un mecanismo en los microorganismos que se conocen como oxaloacetato que se clasifican de acuerdo a su estructura conocidos como: Staphylococcus aureus, Escherichia coli y Pseudoma sp mediante la PEP (ácido fosfoenolpirúvico) se fija en el carbono en la planta. En una reacción catalizada por carboxilasa-PEP, forma oxaloacetato (OAA), un ácido de cuatro carbonos [63].

Dada la diversificación de funciones, podría ser esperable que las características de los distintos órganos sean muy diferentes, poseen un ciclo de vida característico que incluye alternancia de generaciones. A continuación, se clasifica los procesos bioquímicos, reacciones enzimáticas y partes de la planta.

2.7.4 Ciclo de Calvin: Se conoce como ciclo de Calvin-Benson del carbono que produce la fotosíntesis, consiste en mecanismos en serie de ciertos procesos bioquímicos que se realizan en el estroma de los cloroplastos de los microorganismos fotosintéticos de la planta. Si el ciclo de Calvin-Benson se interrumpe por alguna razón, la planta no podrá llevar a cabo la fijación de carbono y la producción de glucosa a través de la fotosíntesis. Esto afectaría el desarrollo y en el crecimiento de la planta, así como su capacidad para producir energía y almacenar nutrientes [64].

2.7.5 Ciclo de Krebs: Consta de una serie de mecanismos físicos y químicos de acuerdo a la composición de la planta enzimática, y otros sustratos metabólicos en dióxido de carbono (CO_2), liberando electrones y protones en el proceso. Los iones son transportados por rizodepósitos como el nicotinamida, flavín adenín dinucleótido (FAD) hacia el flujo de electrones, donde se genera la fosforilación oxidativa. El ciclo de Krebs consiste de una serie de reacciones que son liberadas dos moléculas de CO_2 y generan energía en forma de natural. Las moléculas de energía rica en nutrientes participan en el flujo de electrones, donde se utiliza su potencial reductor para generar ATP (Adenosín Trifosfato o Trifosfato de Adenosina) es la molécula portadora de la energía primaria para todas las formas

de vida (bacterias, levaduras, mohos, algas, vegetales, células animales) todas ellas contienen adenosín trifosfato (ATP) [65].

2.7.6 Raíz. Es un órgano de la planta que es muy fundamental, sirve para absorber los nutrientes y el agua, sólido y líquido. Usualmente todas las raíces no ven la luz, y crecen de forma rizomática, es decir desordenada [66].

2.7.7 Tallo: Es el eje de la parte aérea de las cormofitas y es el órgano que sostiene la planta, crecen en sentido contrario de la raíz y poseen generalmente un sistema de vasos conductores para transportar los nutrientes y sustancias hacia los demás órganos. En ocasiones puede generar la fotosíntesis actúa en el tallo y brinda soporte estructural de ahí nacen algunos microorganismos.

2.7.8 Hojas: Son los órganos de la planta que se especializan en atraer la energía de luz por la fotosíntesis de diversa forma (redonda, alargada), color (entre verde y rojo) y textura en los que se realiza por fotosíntesis. Constan de una zona plana, y de un pecíolo, que une el limbo al tallo. Cuando carecen de pecíolo, se dice que son sentadas. En la base del pecíolo existen unas estructuras denominadas estípulas, de morfología muy variable, Las hojas con más de tres folíolos y en la que éstos se distribuyen a ambos lados del raquis, se denominan pinnaticompuestas o pinnadas.[67].

2.7.9 Flores: Es el órgano de las angiospermas especializado en la reproducción sexual, de los cuales se generan luego los frutos y las semillas. Se componen generalmente de estambres (órganos sexuales masculinos) y pistilos (órganos sexuales femeninos), aunque existen plantas de un único sexo definido.

2.7.10 Semillas: Son embriones listos para producir un nuevo individuo, una vez fecundadas las flores, las plantas que producen semilla. Las semillas se producen sin necesidad de flores y fecundación, todo depende del compuesto y clasificación de la planta [68-70].

2.7.11 Frutos: Es una parte de la planta que deriva del ovario de la flor fecundado y desarrollado. En su interior alberga las semillas que posteriormente germinarán para dar lugar a una nueva planta. Tienen recubrimientos nutritivos, son indispensables para la composición de la vida humana y del planeta, son responsables de la oxigenación en la atmósfera [71]. Tienen como función básica proteger a las semillas de los factores externos y brindar alimento para mantenerse vivas hasta el momento de su germinación como nueva planta.

CAPÍTULO 3

3.1 Materiales

Para llevar a cabo el depósito de SnS sobre el acero inoxidable, se utilizaron los siguientes reactivos: cloruro estañoso dihidratado ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Fermont, acetona ($\text{CH}_3)_2\text{CO}$ Jalmek, citrato de sodio dihidratado granular ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) J.T. Baker, Tiosulfato de sodio anhidro RA ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) Fermont, H_2O destilada (H_2O) DEQ e hidróxido de amonio (NH_4OH) Fermont, acero inoxidable 304. Con esto se obtuvieron películas delgadas sobre acero inoxidable 304 con depósitos a 40 °C, y tiempos determinados de 3 horas hasta 15 horas para su producción de energía.

A continuación, se muestra la tabla 1 de la eliminación de los residuos producidos para este proyecto.

Tabla 1. Eliminación de residuos

Sustancia residual	Contenedor de eliminación	Sustancia residual	Contenedor de eliminación
SnS	B	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	A
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	E	NH_4OH	A
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	A		

3.2 Métodos

3.2.1 Preparación del electrodo acero inoxidable 304

Se cortó el acero inoxidable 304 que fue a una medida de 10 cm², se hizo un lavado con isopropanol con esto para llevar a cabo el depósito SnS sobre el acero inoxidable 304. Posteriormente, se dio un tratamiento térmico a las películas de SnS a 400 °C durante 1 h, 20 mTorr.

3.2.2 Preparación del SnS

Los materiales que se preparan para la síntesis son: Acetona, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, agua desionizada se agita bien los precursores y se da un tratamiento térmico.

3.2.3 Caracterización de electrodos

Una vez obtenido el depósito y tratamiento térmico de SnS sobre el sustrato de acero inoxidable 304, se caracterizó electroquímicamente mediante curvas de polarización utilizando la técnica de cronoamperometría y voltamperometría de barrido lineal y cíclica, para el desempeño de la CCM, teniendo como objetivo generar curvas I-V, asociadas al comportamiento del electrodo de trabajo en un potencial que inicia hasta un potencial final.

3.2.4 Construcción y evaluación de las CCM basadas en aloe vera

Para la construcción de la celda de combustible microbiana se utilizaron macetas de dimensiones de 15 cm de largo, plantando una sábila pequeña por maceta. Lo anterior fue colocando dos electrodos, uno fue el acero inoxidable 304 de 10x10 cm y el otro también acero inoxidable 304 pero con el depósito de SnS variando el espesor del semiconductor y a cada electrodo con el baño químico se le dio un tratamiento térmico a 400 °C. En este método de la construcción de la planta aloe vera se cosechó en una maceta los depósitos que se hicieron de 3 a 15 horas cada una, en el ánodo se colocó el electrodo de SnS sobre el acero inoxidable 304. Para su evaluación eléctrica de las CCM se realizó con un multímetro agilent u1252a, la medición del voltaje a circuito abierto y corriente a corto circuito. Se usó el potencióstato/galvanostato metrohm modelo autolab PGSTAT302N, se obtuvo curvas de polarización y cronoamperometría con el fin de evaluar sus parámetros eléctricos (punto máximo de potencia y resistencia interna) y desempeño de las CCM. Para energizar dispositivos de bajo consumo mediante el uso de una CCM, se evaluó el tiempo de carga de un elemento de almacenamiento de energía utilizando un adquisidor de señales (DAC-BNC-6216). Durante la evaluación, se conectó el adquisidor de señales al sistema de CCM para capturar en tiempo real los datos de la energía generada y

transferida hacia el elemento de almacenamiento. La configuración empleada aseguró una medición precisa del tiempo requerido para cargar el elemento de almacenamiento de energía bajo diferentes configuraciones de CCM.

3.3 Técnicas de caracterización

3.3.1 Análisis de Difracción de rayos X

XRD es una técnica debido a que se utiliza las características no destructivas relacionadas con la estructura cristalina de los sólidos que incluyen geometría y parámetros de red, orientación de monocristales, orientación de policristales e identificación de materiales desconocidos [72]. Es una caracterización de propiedades físicas-químicas, base de posibles aplicaciones, muestra la pureza de polvos sintetizados determinados. Tiene por objetivo determinar la composición de las muestras, así como propiedades térmicas y termomecánicas. Posteriormente, a las sustancias que se encuentran en un compuesto de una composición química y el tipo de estructural esto los hace ser cristales que se denominan como su “fase”, pueden ser mezclas y pueden contener componentes cristalinos y no cristalinos. Los rayos x que son emitidos están compuestos de una cierta mezcla en diferentes longitudes de onda y variación de su intensidad en λ que depende de un voltaje [73]. Un rayo que difracta se definen de rayo que se compone de un número de ciertos rayos que son dispersados que son reforzados mutuamente. Una difracción se caracteriza por lo tanto de un fenómeno de dispersión. Cada átomo dispersa una cierta radiación de un incidente de todas y cualquier dirección, por lo que en algunas son direcciones en los rayos dispersados que están completamente en su fase y por ende es reforzado mutuamente que forma rayo difractado.

La identificación de las fases se puede realizar mediante un rayo que es difractado obtenido de la muestra desconocida de los patrones de las bases de datos de referencia. [74]. También puede crear una base de datos como una referencia a partir de patrones de difracción de fase pura, medidos o de patrones

publicados en la literatura científica o de sus propias mediciones (Ec. 2):

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \text{----- ecuación 2}$$

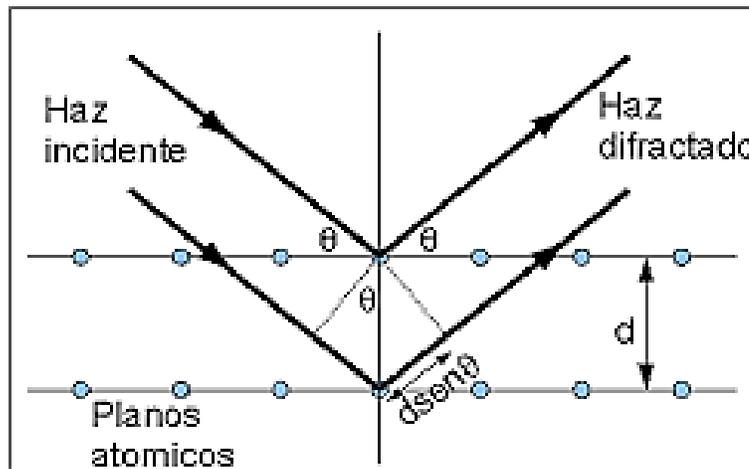


Figura 2. Difracción de rayos X (XRD) planos de un cristal [74]

3.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Es una técnica analítica y su función de trabajo es la energía mínima necesaria para mover un electrón de una superficie y liberarlo al vacío. Se calienta y se funde antes de liberar un electrón. Los análisis microscópicos posibilitan la obtención de registros gráficos de las estructuras más pequeñas de los materiales. Resolución escalas grises, representa la cantidad de electrones que nos está dando señal. El patrón de intensidad de corriente es lo más brillante que esté la muestra, esto quiere decir que hay más corriente (más flujo de electrones, que interactuó con la muestra). Si se topa con un aislante la energía se acumula los electrones y se ve un brillo una luz que no se puede mostrar la imagen [75]. Es sensible a señales electromagnéticas, vibracional y ruido, tiene una resolución máxima óptica de 1 nm. Utiliza electrones, no puede de manera directa no analiza muestras que tenga energía ionización (C, O, N) (muestras orgánicas ejemplo: polímeros). Algunas de técnicas complementarias son: EDX, EBDS y STEM.

Técnica EDXS: (espectroscopia de energía dispersiva de RX) nos da información cualitativa que elementos está en la muestra y que concentraciones tiene la muestra y semicuantitativa de la muestra. Composición del material, no detecta litio, berilio, hidrogeno.

Técnica EBSD: (difracción de electrones retrodispersados) nos da información cristalográfica (la partícula tiene estructura cristalina y también poder determinar donde se encuentra cada cara del cristal). Características y planos se acomodan en los cristales, se aplica para metales puros, pulido acabado espejo. Contraste en Z, Se saca electrones si tenemos diferentes números atómicos tendremos diferente contraste [76].

Técnica STEM: significa que podemos convertir un SEM en TEM. Es como tener un TEM muy obsoleto.



Figura 3 Microscopía electrónica de barrido [76]

3.3.3 Curva de polarización

Se conocen como potencial-corriente (P-I) que se instruye en análisis fundamentales en medir desempeño de la celda de combustible microbiana. Un potencial real (E_R) puede existir en CCM que está dada en el potencial teórico (E_T), son varias pérdidas que se pueden presentar debido a las configuraciones de las CCM. Se les denomina sobretensión, sobrevoltaje o sobrecorriente que se constituye a partir de: curva de polarización activada, curva de polarización óhmica y curva de polarización concentrada [77]. Una región de curva de activación es debido al voltaje máximo y menor corriente que hay una pérdida en el voltaje y esto causa principalmente por la lenta electro-reducción de oxígeno en el cátodo. La curva de polarización activada ocurre de una reacción electroquímica por la velocidad en una superficie del electrodo que controla la cinética, es decir por activar la curva polarizada es relacionada directamente con velocidades en reacciones electroquímicas.

3.3.3.1 Curva polarización óhmica

La cuantificación del proceso es la mayoría utilizada en su totalidad, es suministrada información básica con la contribución de cada proceso en el ánodo y cátodo, sin embargo permite una cuantificación en forma que se aproxima a una densidad de corriente en la corrosión mediante un flujo del método de intersección. La curva de polarización en la resistencia (η_{RE}) (V), también llamada curva de polarización óhmica, es interpretada con cualquier caída óhmica (IR) por parte del electrodo, para una formación de capas sobre la superficie del electrodo, que impiden el paso de los electrones [78]. La curva de polarización activada (η_{AC}) (V) es relacionada con la energía de activación, que es necesaria para la reacción del electrodo que pueda verificar cierta velocidad que es dada y su resultado es de la barrera de energía en su interfase del electrólito.

3.3.3.2 Curva de polarización de concentración

La curva de polarización de concentración consiste una acumulación de sal en cierto a una cercanía de la membrana del ánodo, esto permite de una concentración que sea mayor. Con incrementar una concentración dada de una sal sobre una concentración de sal con respecto a despolarizada, este fenómeno es afectado negativamente al flujo de los electrones por ende para grandes concentraciones de una forma para unas mismas condiciones, a mayor polarización de la concentración menor flujo de permeado puede obtener como resultado [79].

3.3.4 Potencia

Se le considera una técnica analítica en la que escalona un potencial eléctrico al electrodo de trabajo y puede controlar la corriente resultante del proceso faradaico que esto puede ocurrir con el electrodo en función del tiempo. Permite medir una intensidad de corriente para su función del tiempo cuando se aplica un potencial constantemente con el electrodo de trabajo, esto permite medir un diferencial de potencia en función del tiempo que es aplicado a una corriente constante [80].

3.3.5 Tiempo de carga al sistema de almacenamiento electroquímico

Se lleva a cabo a través de la conversión de energía química en energía eléctrica, y en energía eléctrica a energía química producida en Joules. Esto puede producir en una celdas electroquímica que se lleva a cabo a través de reactivos de ciertas sustancias químicas que con esto pueden permitir y liberar electrones. El uso más llamativo que se puede conocer son el almacenamiento químico en las baterías. Con las baterías de ion de litio, los dispositivos pueden suministrar electricidad a nuestros hogares, además respaldan la estabilidad de la red eléctrica y el despliegue de fuentes energías renovables. Una de sus

ventajas es que permite almacenar grandes cantidades de energía en espacios sumamente pequeños. Por otra parte, en cuanto a sus desventajas, hay que resaltar que el almacenamiento de energía con métodos químicos se degrada con el tiempo [81].

CAPÍTULO 4. Resultados y discusión

Se depositaron películas de SnS sobre vidrio para llevar a cabo la caracterización del material, también fueron depositados sobre acero inoxidable 304 para colocarlos como electrodos en las plantas de aloe vera. El depósito fue desde 3 h hasta 9 h a 40°C. Todas las películas tanto las depositadas sobre vidrio como en el acero fueron tratadas térmicamente a 400 °C a 20 mTorr.

4.1 Caracterización de películas de SnS depositadas sobre vidrio

4.1.1 Análisis de difracción de rayos X

En la figura 8 se observan los picos de difracción de rayos X de la película SnS de 40 °C con un tratamiento a 400 °C en un lapso de 60 min. Los picos de difracción corresponden al SnS se observan correspondientes a los planos cristalográficos (1,0,1), (111), (131) (0,0,2), (1,6,0) (0,4,2) y (2,5,1). Indicando la presencia de SnS cristalino en su fase ortorrómbica. El patrón de rayos X corresponde a las reflexiones de la ficha JCPDF 39-0354, el cual corresponde a una estructura cristalográfica ortorrómbica del SnS.

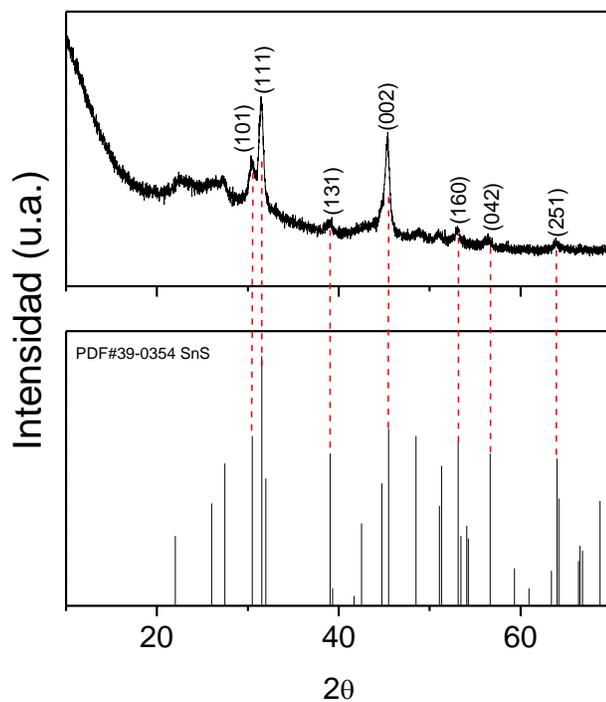


Figura 4. XRD SnS depositado durante 9 h a 40°C

4.1.2 Mediciones eléctricas de I y V de las películas SnS en las CCM

Las películas de SnS obtenidas por baño químico con distintas horas de depósito tratadas térmicamente a 400 °C durante 1 h, se colocaron en las plantas de aloe vera para formar parte de las CCM. Estas se construyeron de acuerdo con lo descrito en el capítulo 3. Para ello se utilizaron sábilas, tierra para plantas, agua de la llave como hidratante y siete macetas colocando una película en cada una de las macetas, iniciando con la película depositada de 3 h, después 4 h, 5 h y así sucesivamente hasta 9 h. Cabe mencionar, que se tomaron dos plantas de referencia, una planta fue solamente tierra y la segunda fue tierra con los dos electrodos de acero inoxidable sin película. La clave de cada una de ellas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 2. Descripción de las CCM

No.	Descripción	Clave
1	Maceta solamente con tierra	Geo
2	Maceta con electodos de acero inoxidable 3024 sin película	TA304
3	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 3 h de depósito de SnS	ASnS-3h
4	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 4 h de depósito de SnS	ASnS-4h
5	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 5 h de depósito de SnS	ASnS-5h
6	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 6 h de depósito de SnS	ASnS-6h
7	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 7 h de depósito de SnS	ASnS-7h
8	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 8 h de depósito de SnS	ASnS-8h
9	Maceta con electodos de acero inoxidable 304 con electodos de 9 h de depósito de SnS	ASnS-9h

Se utilizaron las películas de SnS depositadas en sustratos de acero inoxidable como electrodos como se describe en la sección 2.2 (Figura 1). Los electrodos fueron colocados en la maceta con una separación entre los mismos de 5 cm de separación.

Para llevar a cabo las mediciones de voltaje y corriente en cada de las CCM, primero se regaron las plantas y después de 5 min se realizaron las mediciones de voltaje a circuito abierto y corriente a corto circuito utilizando un multímetro de marca agilent u1252a. En la figura 9, se muestran los promedios de las lecturas del voltaje de las PMFC, esta fue tomada cada hora durante cuatro meses. Las CCM etiquetadas como Geo, TA304, ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h son las que se utilizaron para comparar los resultados de corriente y voltaje, ya que el SnS incorporado como electrodo dio resultados mayores de corriente y voltaje (0.6 V - 0.8 V), y las celdas de Geo y TA304 son las de referencia como se observa en la figura 9.

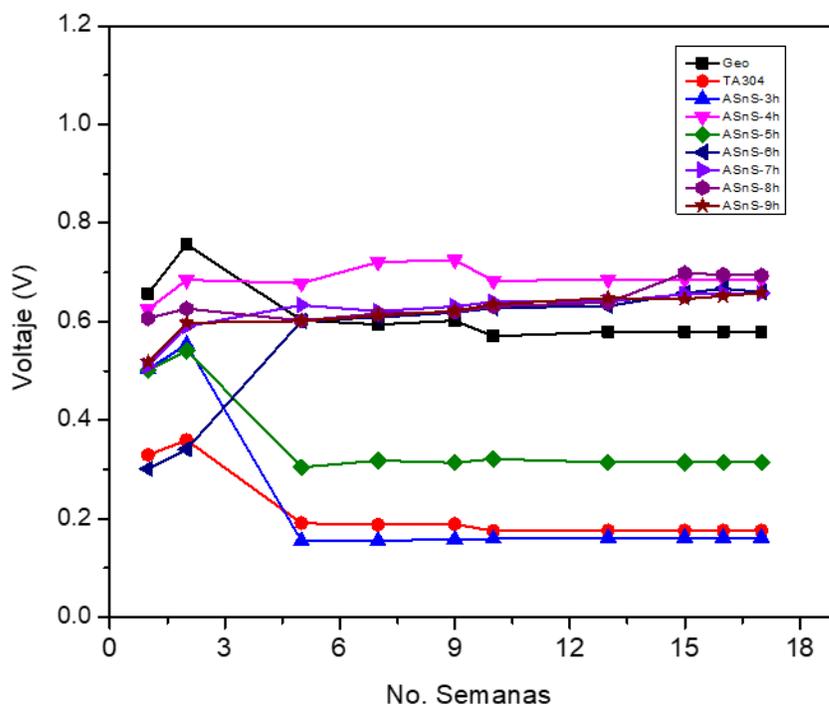


FIGURA 5. Medición voltaje de las CCM

En la figura 10, se muestra la corriente de las CCM, dando lectura cada hora durante cuatro meses. Se observa que las corrientes más altas fueron de las CCM, etiquetadas Geo, TA304, ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h, los cuales son entre 0.4 mA a 3 mA. Con los datos obtenidos de voltaje y corriente se observa que las mejores CCM son las de mayor voltaje y corriente (ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h), debido a que el voltaje se mantendrá constante cuando la corriente es alta. Por lo anterior, la planta que solamente tiene tierra podrá producir alto voltaje como la planta que tiene los dos electrodos de acero inoxidable, no permanecerá este debido a su baja corriente. Por lo tanto, se observa el impacto que tiene el SnS depositado sobre el acero inoxidable para realizar el trabajo como un electrodo eficaz.

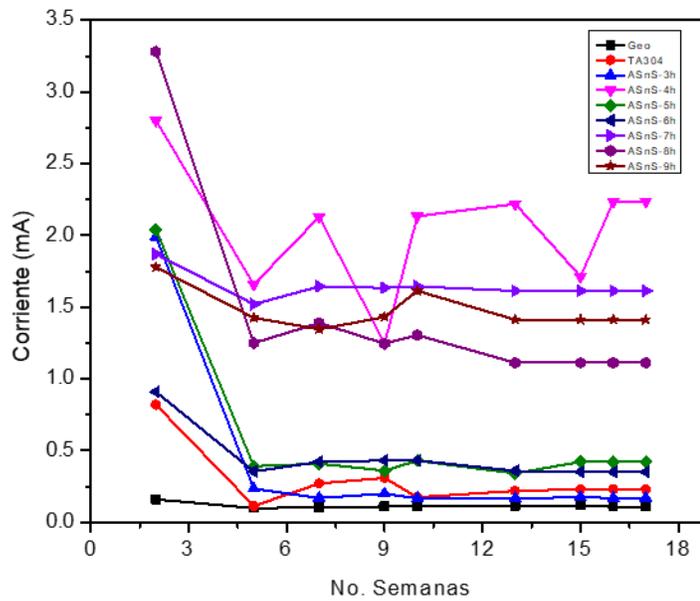


FIGURA 6. Medición corriente de las CCM

En las figuras 11 y 12, se muestran los voltajes y corrientes más altos de las CCM para comparar con las plantas sin electrodos (Geo) y con electrodos sin película. De aquí en adelante solamente se mostrarán los resultados de estas CCM: Geo, TA304, ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9H.

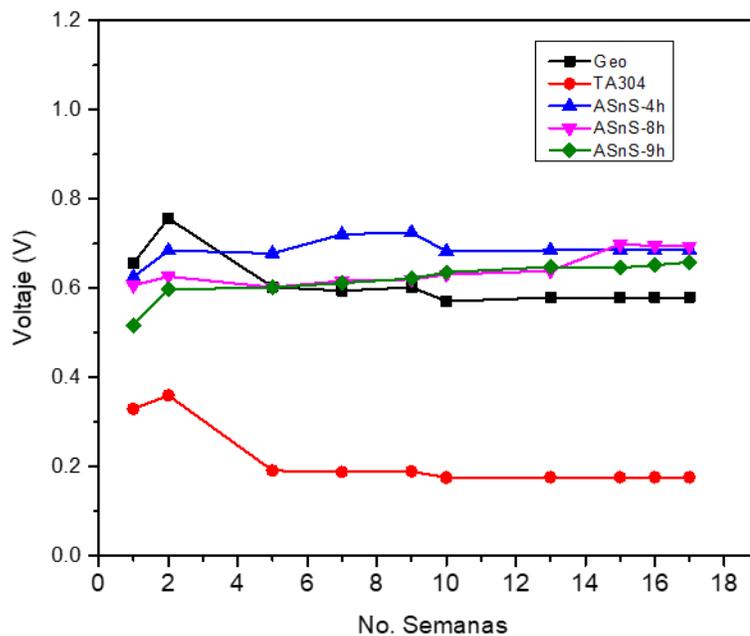


FIGURA 7. Medición voltaje de las CCM

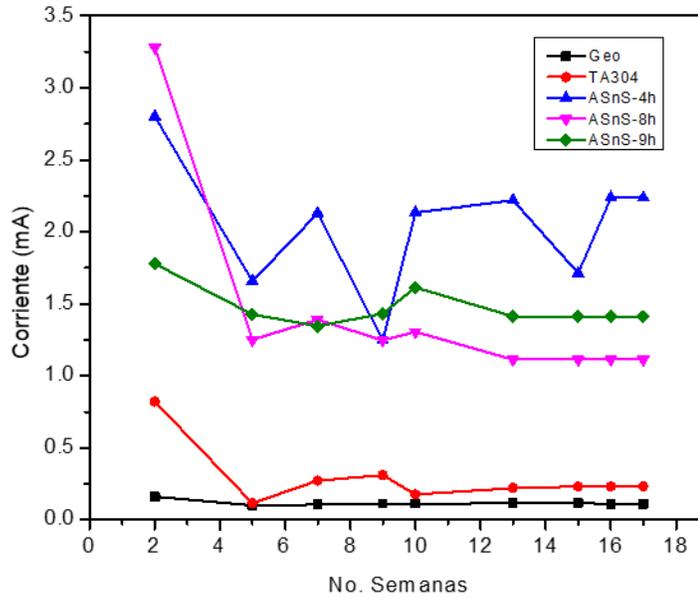


FIGURA 8. Medición corriente de las CCM

4.1.3 Curvas de polarización de las mejores CCM

Las mediciones de las curvas de polarización se hicieron midiendo en un solo día (habiendo transcurrido 120 días después de haber formado las CCM). En la tabla 2 se muestran las resistencias que se utilizaron para generar las curvas de polarización, iniciando con la resistencia de 2 ohms hasta 1 mega ohm.

Tabla 3. Resistencias utilizadas para generar las curvas de polarización

No.	Resistencia (ohms)	No.	Resistencia (ohms)
1	2	14	220
2	3	15	270
3	5	16	330
4	7	17	470
5	10	18	510
6	22	19	680
7	33	20	1 k
8	47	21	2 k
9	51	22	4.7 k
10	68	23	5.1 k
11	100	24	10 k
12	150	25	1 M
13	200	-	-

En la figura 13 y 14, se presentan las curvas de polarización de las CCM, observando que los voltajes y corrientes resultaron más favorecidos cuando se tienen los electrodos de SnS alcanzando un máximo de 0.583 V y 10^{-4} mA, respectivamente. Por el contrario, sin este material fue la máxima de 0.447 V y 9.8×10^{-6} mA en el caso de Geo. De lo anterior, se observa que hay un acoplamiento entre los electrones generados por el microorganismo y el material semiconductor debido al exudado y el rizodepósito, siendo el primero el canal de transferencia electrónica (líquido que se filtra desde los vasos sanguíneos hacia los tejidos cercanos de la planta) y el segundo son los ácidos orgánicos, carbohidratos, proteínas y otros depósitos para la transferencia de electrones a través del exudado generando una corriente en el ánodo.

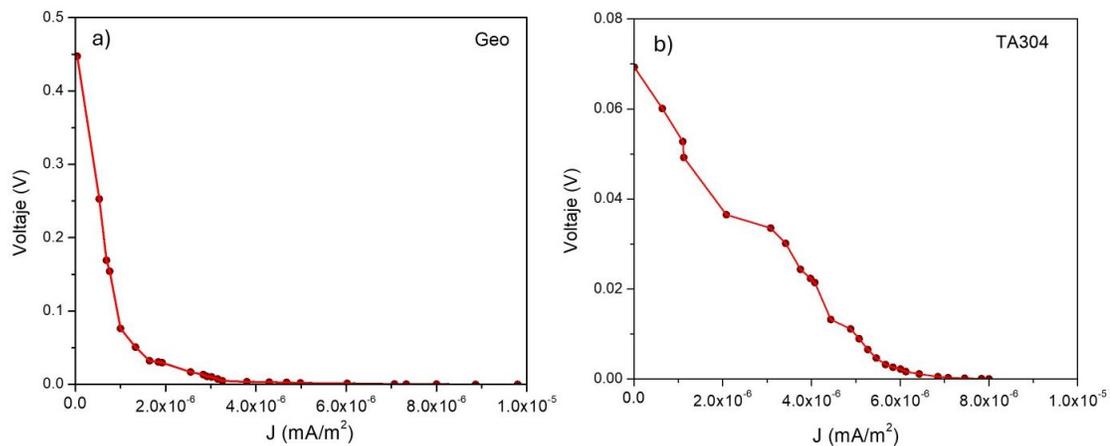


FIGURA 9. Curvas de polarización de las CCM de Geo y TA304

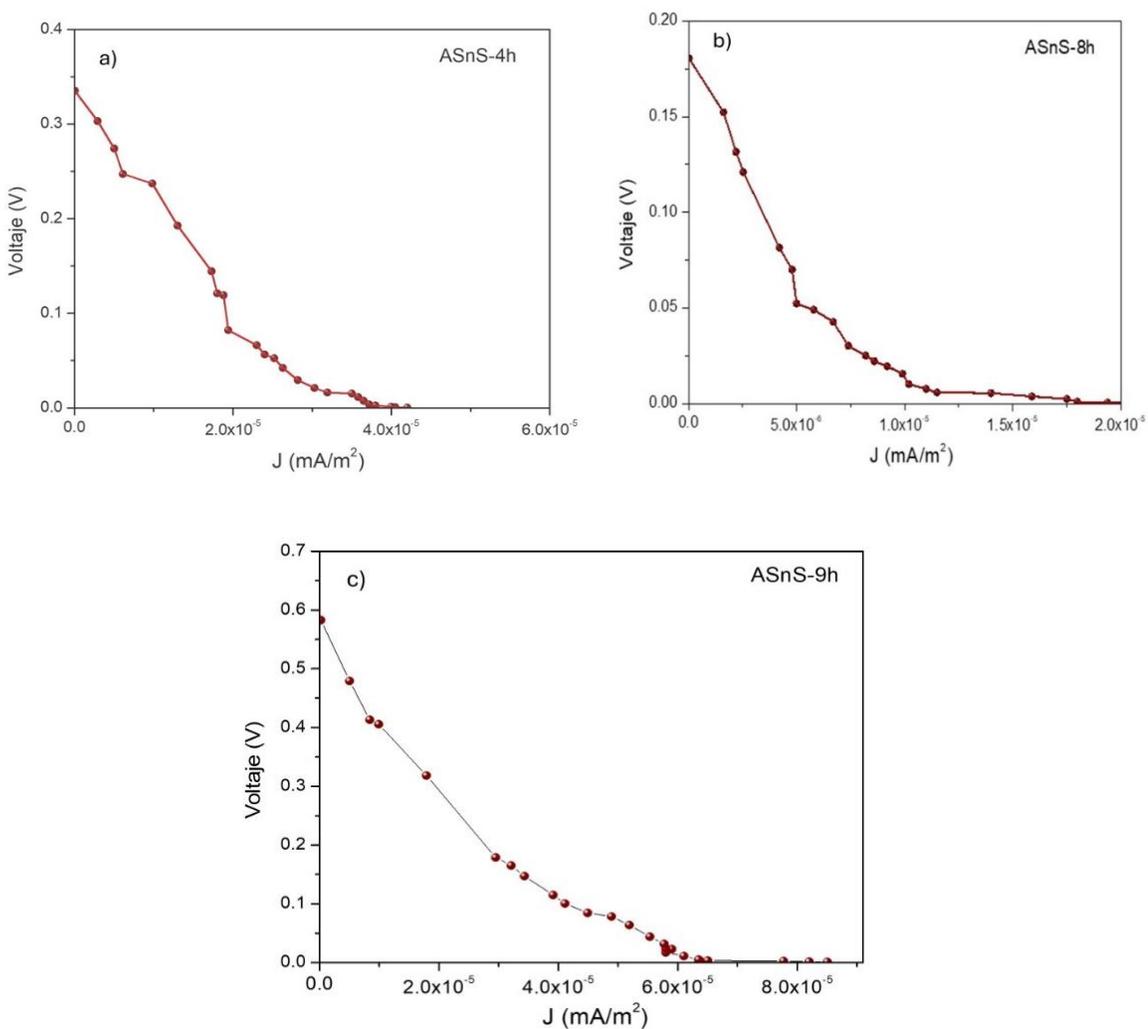


FIGURA 10. Curvas de polarización de las CCM de ASnS-4h-14a, ASnS-8h y ASnS-9h

De los anterior, en la tabla 3 se concentraron los voltajes a circuito abierto cuando la densidad de corriente es igual a 0 y viceversa, a $V_{oc}=0$ se tienen valores de corriente a corto circuito. Se obtienen voltajes para Geo de 447 mV con corriente muy baja del orden de 10^{-6} mA. Por otro lado, para AsnS-9h se demuestra el más alto voltaje que es 583 mV y corriente del orden de 10^{-5} mA, lo que conlleva que se tendrá mayor energía cuando hay electrodos formados con SnS.

Tabla 4. Valores de V_{oc} cuando $I_{sc}=0$, y $V_{oc}=0$ para valores de I_{sc}

CCM	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/m ²)
Geo	0.447	9.8×10^{-6}
TA304	0.069	8.0×10^{-6}
ASnS-4h	0.335	4.20×10^{-5}
ASnS-8h	0.180	6×10^{-5}
ASnS-9h	0.583	1×10^{-4}

4.1.4 Potencia

A continuación, se presentan las curvas de densidad energética que indica la cantidad de energía eléctrica transferida de una fuente generadora a un elemento consumidor por unidad de tiempo, se considera que es la cantidad de energía que consume o genera.

En la figura 15 y 16, se presentan la potencia generada, la fuente CCM entrega energía a cargas con diferente valor, observando que las potencias fueron mejores cuando se tienen los depósitos de SnS alcanzando valores de 5.69×10^{-5} W continuamente. Por el contrario sin el depósito la potencia alcanzó de 1.34×10^{-7} W para el caso de CCM-Geo. Dicho con antelación, los microorganismos en los exudados radiculares de alto peso molecular son liberados hacia el suelo mediante los canales proteicos que se encuentran

presentes en la raíz para la transferencia de los electrones. Dentro los microorganismos en los exudados radiculares de alto peso molecular, se encuentra un conjunto de carbohidratos, ácidos grasos y proteínas lo que los hace generar mayor corriente, y de acuerdo con la composición de los exudados dentro de las raíces varía con la biología y el crecimiento de la planta. Es por ello que los iones son relativamente generados dependiendo el tipo de la clasificación de la planta.

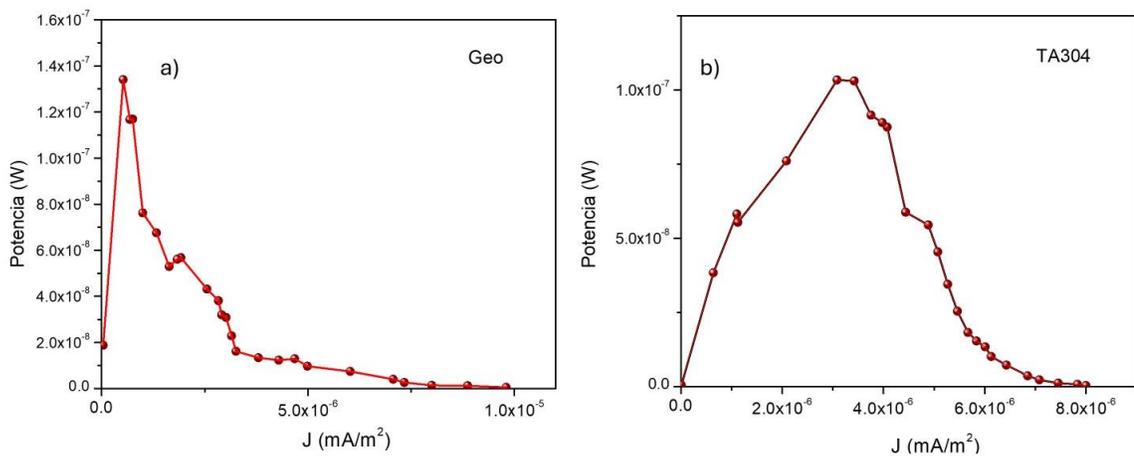
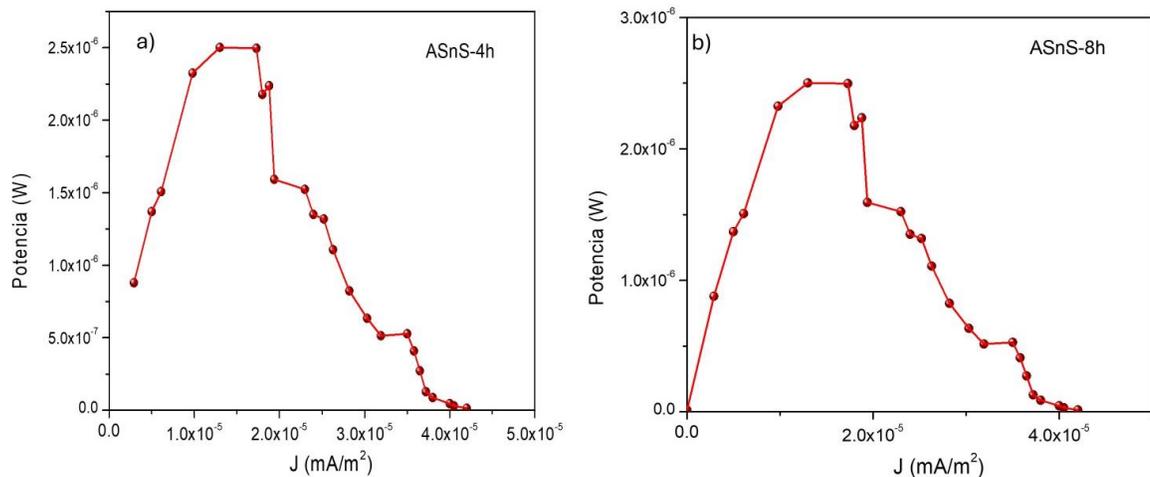


FIGURA 11. Potencia de las CCM de Geo-15a y TA304-15b



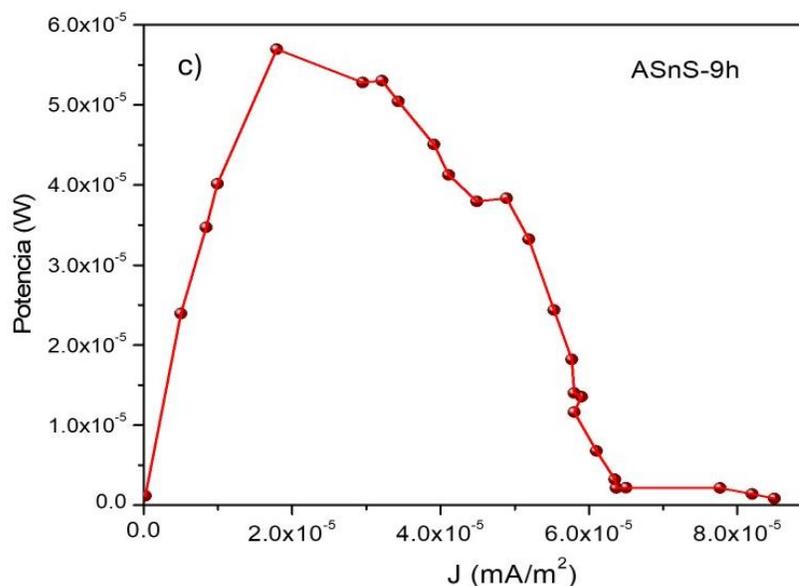


FIGURA 12. Potencia de las CCM de ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h

De lo anterior, se observa en la tabla siguiente que se obtienen los valores de potencia con las cargas que se dieron a conocer (tabla 2). Se obtuvieron valores sin depósito en la CCM-Geo de 1.34×10^{-7} W, por otro lado del extremo cuando se tiene una CCM con el depósito SnS de 9h y se obtuvo la potencia más alta que fue de 5.69×10^{-6} W, lo que significa que tiene mayor potencia en un electrodo de SnS. De acuerdo con lo reportado, las muestras que contienen SnS en los electrodos tienen una alta potencia para saber la cantidad de energía que estará conectado a varios dispositivos a la vez.

Tabla 5. Valores de Potencia de las CCM

CCM	Potencia (W)
Geo	1.34×10^{-7}
TA304	1.03×10^{-7}
ASnS-4h	2.5×10^{-6}
ASnS-8h	2.5×10^{-6}
ASnS-9h	5.69×10^{-5}

4.2 Producción de energía

4.2.1 Voltaje eléctrico

La poca probabilidad de obtener un voltaje menor es debido a la termodinámica, cinética y la distancia entre los electrodos, lo que conlleva la reacción redox en los microorganismos que son transferidos de forma positiva al área efectiva del ánodo.

4.2.2 Curvas de voltaje contra tiempo (V-t)

Para las mediciones de las CCM, se hicieron una evaluación de las CCM y un promedio general de todas para su información de sustentabilidad y obtención de energía para su evaluación.

4.2.3 DAC Adquisidor digital de señales en las CCM

Se hicieron mediciones con el DAC (figura 17), para saber la duración que entregó el voltaje de la CCM y se elaboró solamente con los datos que se obtuvieron en las curvas de polarización y potencia que fueron reportados anteriormente.

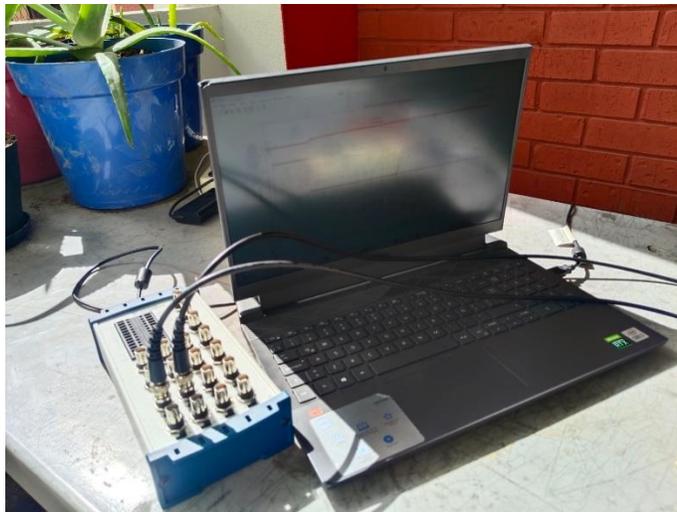


Figura 13. DAC Adquisidor de señales

4.2.4 Capacitor 15F a 5.5V en una CCM

La producción energética se optimizó con un capacitor de 15F a 5.5V al circuito, estos dispositivos almacenan la energía producida por la CCM y la liberan luego de haber alcanzado un valor determinado y se utilizó para la alimentación energética.

En la figura 18, se mostró que los microorganismos con el depósito de SnS, obtuvieron mayor alcance de voltaje después de la hora y se mantiene constante. Para hacer las mediciones se utilizó un cosechador de energía que es conocido como convertidor-elevador Buck de 5V.

En la figura 19, se muestran las comparaciones para este caso se obtuvieron varios voltajes en Geo y TA304 muestran un menor voltaje a circuito abierto a comparación de las demás que tienen tratamiento térmico, para la película ASnS-4h se obtuvo con un voltaje a circuito abierto de 0.7 V a 1 hora manteniendo su voltaje, en la película ASnS-8h obtuvo un voltaje a circuito abierto de 0.8 V en 1 hora manteniendo su voltaje y para la película de ASnS-9h obtuvo un voltaje a circuito abierto de 0.9 V pasando de 1 hora debido al tiempo de depósito y tratamiento térmico que se generó. Como se muestra en la imagen, se obtuvieron un mayor almacenaje de voltaje en las CCM en serie con las películas de ASnS-4, ASnS-8 y ASnS-9h con un voltaje a circuito abierto y de mayor potencia de 1.1V pasando a más de 1 hora. Debido al tiempo de depósito y tratamiento térmico que se generó. Se mostró un análisis de la abundancia relativa de potencia de los depósitos obtenidos por SnS, se obtuvo un enriquecimiento de microorganismos en los ánodos comparando con los que no tienen depósito y sin depósito, en las CCM y el capacitor relacionado a la producción de corriente en estas celdas. Las CCM fueron monitoreadas, observando que el voltaje de la celda aumentaba con el pasar de las horas mientras que las celdas de Geo y TA304 no fueron comportadas en aumento, con las anaerobias y después en el medio líquido en aerobiosis desarrollado, produjeron mayor voltaje que cuando no tenían agua, evidenciándose el efecto

de los microorganismos oxalotróficas asociadas a plantas en las CCM. Asimismo, con el programa matlab se estimaron las curvas para cada experimento realizado para poder calcular el voltaje generado y el tiempo. Para su medición que están por encima de la recta voltaje/tiempo, se demuestra que en algún momento el proceso tuvo consumos bajos para buenos niveles de producción de energía.

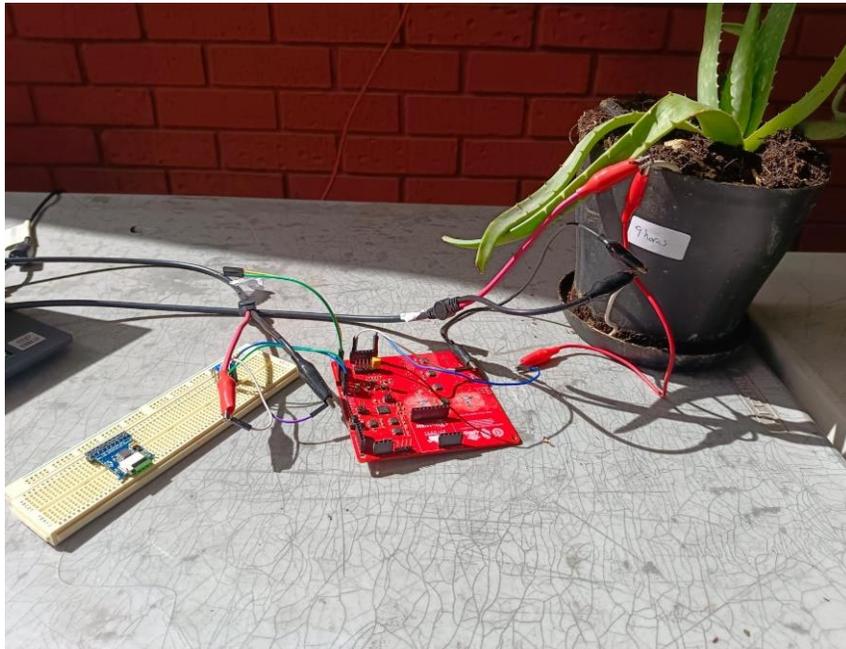


Figura 14. Cosechador de energía convertidor-elevador Buck de 5V

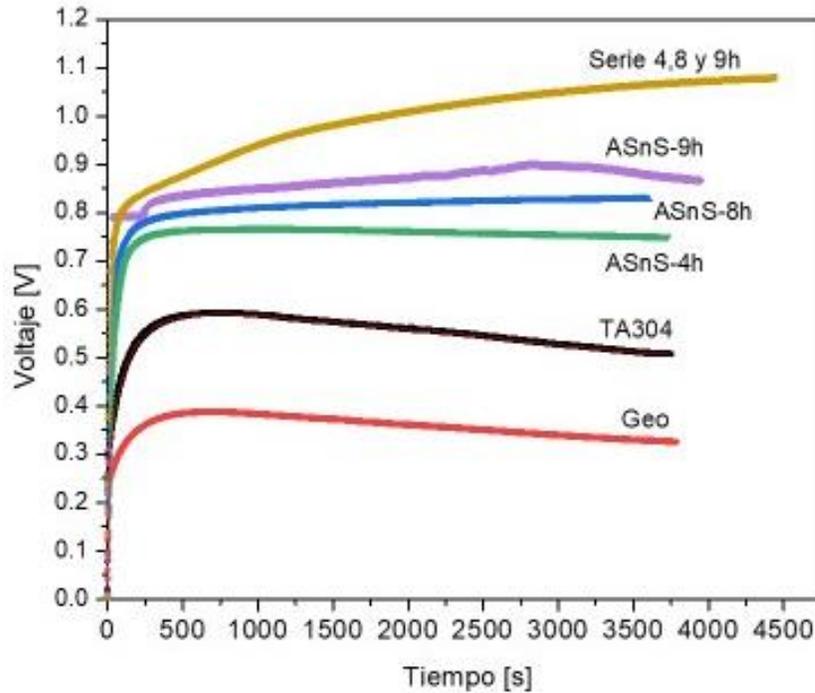


Figura 15. Total voltaje de carga del capacitor

4.2.5 Aplicación en dispositivos de bajo consumo

En la Figura 20, se obtuvieron mayor alcance de voltaje después de la hora y se mantiene constante en serie la ASnS-4,8 y 9h. En el eje "Y" es energía en Joule y en el eje "X" tipo de CCM. Se observa que la CCM-Geo se obtuvo 2.5 J de energía, con la CCM-TA304 se tiene 1 J, mientras que las CCM con SnS a diferentes tratamientos se tienen energía por arriba de 4.5 J siendo la de ASnS-9h se alcanza una energía de 6 J. Por otro lado cuando se conectan en serie las CCM con SnS se alcanza una energía superior a los 8 J se generó mayor energía que cualquier otra. De acuerdo con los valores obtenidos, son implementados en la aplicación para dispositivos inteligentes de bajo consumo como; celulares, relojes, wi-fi, etc.

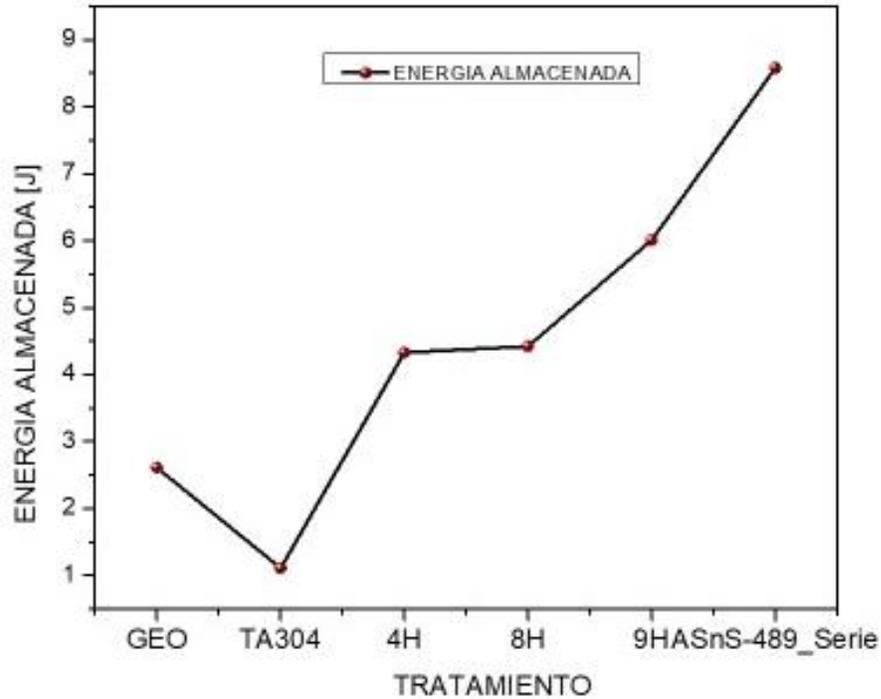


Figura 16. Energía almacenada de configuración CCM

4.3 SEM de las CCM

A continuación, se muestran las micrografías de la morfología de las bacterias con el material SnS depositado sobre el acero inoxidable 304 el electrodo ASnS-9h, para analizar la superficie que tuvo el electrodo y el microorganismo. En la figura 17, se muestra la micrografía del material SnS depositado sobre el material acero inoxidable 304 mostrando a 5,000 aumentos con un voltaje de 3.0 KeV con una distancia entre el cañón y la muestra de 9.1 mm y un diámetro de 1 micra. En la figura 17, se muestra la micrografía líneas intergranulares por la corrosión y las bacterias que se han producido. Se observa el SnS sobre la superficie del acero y las fronteras de grano que se forma.

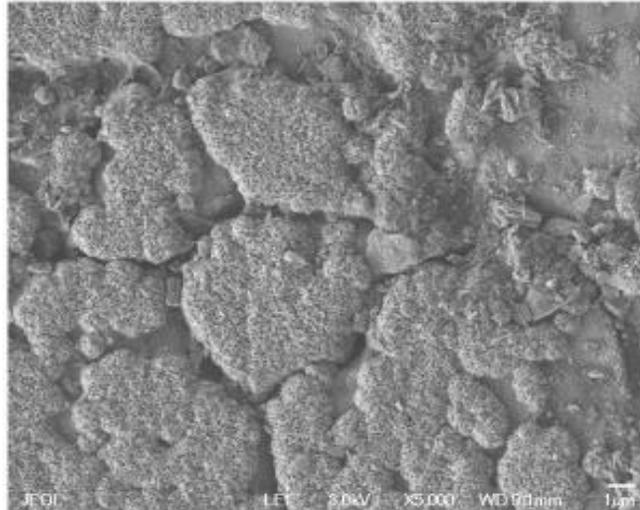


Figura 17. Muestra AsnS-9h retirada de la planta para análisis de SEM a 5000X

En la figura 18, se muestra la micrografía del material SnS depositado sobre el material acero inoxidable 304 con un voltaje de 3.0 KeV con una distancia entre el cañón y la muestra de 9.1 mm y un diámetro de 1 micra. En la figura 18, se muestra la micrografía a 10,000 aumentos, se observan millones de colonias de bacterias con el acero inoxidable 304 y el material depositado del SnS.

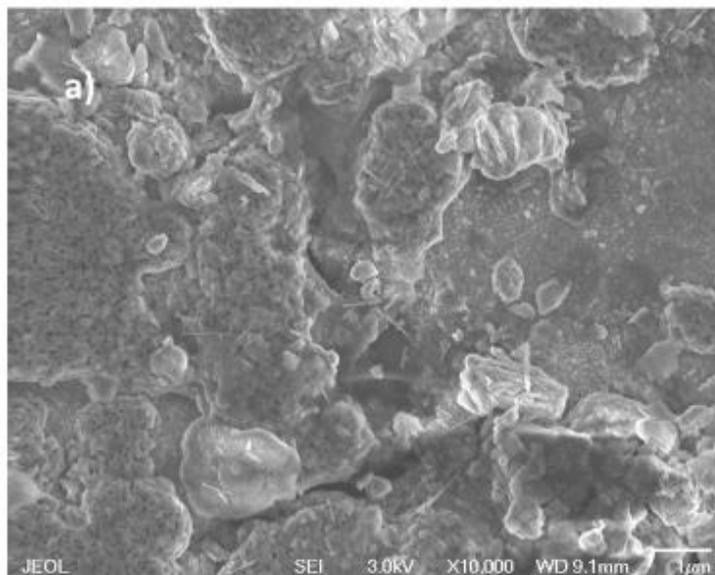


Figura 18. Muestra AsnS-9h retirada de la planta para análisis de SEM 10000X

En la figura 19, se muestra la micrografía del material SnS depositado sobre el material acero inoxidable 304 con un voltaje de 3.0 KeV con una distancia entre el cañón y la muestra de 9.1 mm y un diámetro de 1 micra. Se muestra la micrografía y se observan colonias de espirilos de bacterias en el acero inoxidable 304 con el material SnS depositado. En la micrografía se observa al fondo millones de colonias de bacterias espirilos, abajo se muestra vibriones de bacterias aglomeradas y en la parte central el material depositado SnS con el acero 304 la bacteria que tiene forma que se le considera como pseudoma.

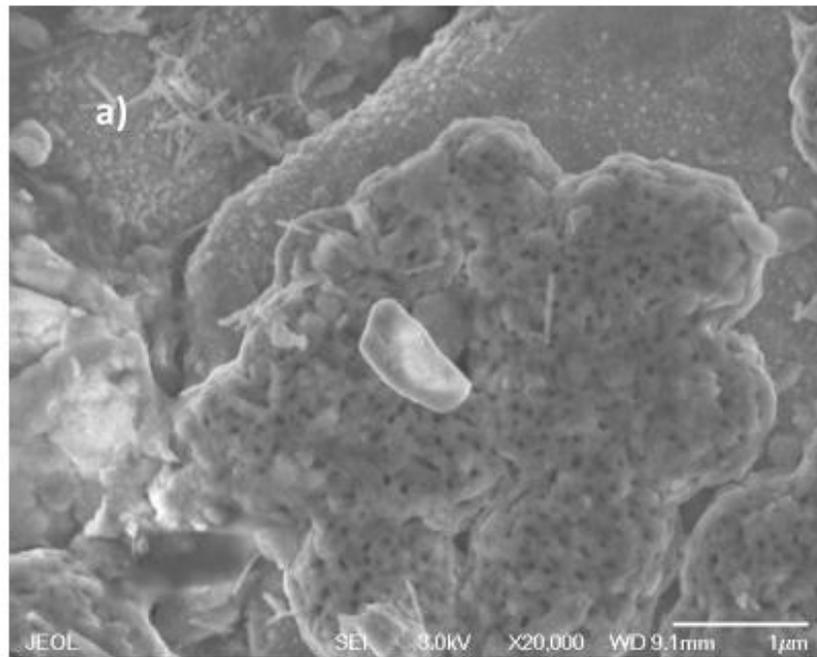


Figura 19. Muestra AsnS-9h retirada de la planta para análisis de SEM 20000X

Conclusiones

En las configuraciones de la CCM de aloe vera con espaciado a 5 cm los electrodos en este estudio han podido producir un voltaje eléctrico. se obtuvieron materiales que fueron recipiente para macetas de 15 cm de longitud, tierra para macetas, plantas de aloe vera, acero inoxidable 304, malla de acero, cable calibre 14, tornillos, protoboard de 800 puntos, resistencias de 2ohm a 1 megahom, cosechador de energía, adquisidor de señales, software Matlab. Se cosecharon las plantas plantando una sábila pequeña por maceta bajo condiciones con los electrodos de distancia entre el ánodo y el cátodo para su obtención de energía se fue colocando dos electrodos, uno fue el acero inoxidable 304 de 10x10 cm y el otro también acero inoxidable 304 pero con el depósito de SnS a cada electrodo con el baño químico se le dio un tratamiento térmico a 400 °C. los depósitos que se hicieron de 3 a 15 horas cada una, en el ánodo se colocó el electrodo de SnS sobre el acero inoxidable 304. Para su evaluación eléctrica de las CCM se realizó con un multímetro. Se usaron resistencias para obtener las curvas de polarización y potencia con el fin de evaluar sus parámetros eléctricos (punto máximo de potencia y resistencia interna) y desempeño de las CCM. Se evaluó el tiempo de carga de un elemento de almacenamiento de energía utilizando un adquisidor de señales para energizar dispositivos de bajo consumo mediante el uso de una CCM. Durante la evaluación, se conectó el adquisidor de señales al sistema de la CCM para capturar en tiempo real los datos de la energía generada y transferida hacia el elemento de almacenamiento, la configuración empleada aseguró una medición precisa del tiempo requerido para cargar el elemento de almacenamiento de energía bajo diferentes configuraciones de CCM. Las CCM con mayor voltaje fueron las plantas etiquetadas como Geo, TA304, ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h con voltajes 0.44 a 0.58 y con el capacitor de 15F a 5.5 V, se obtuvieron de 0.6 V a 0.8 V mientras que en seria a 1.1 V. Se realizó las mediciones de V_{oc} y I_{sc} , donde los resultados más significativos fueron en la planta ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h. Las corrientes más altas fueron Geo, TA304, ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h, se obtuvieron entre 0.4 mA a 3 mA. En las curvas de polarización, se obtuvo que Geo tiene una densidad de corriente

mayor en corto circuito se obtuvo su valor fue de 9.8×10^{-6} mA y TA304 su valor fue 8.0×10^{-6} mA. En las curvas de polarización el voltaje a circuito abierto de Geo fue mayor que la de TA304 en donde Geo fue de 0.44 V mientras que TA304 fue de 0.06 V. En las curvas de polarización se obtuvo la CCM de ASnS-8h y ASnS-4h con una densidad de corriente en corto circuito su valor fue de 4.20×10^{-5} mA, y ASnS-9h de 8.5×10^{-5} mA. En las curvas de polarización, el voltaje a circuito abierto de ASnS-4h y ASnS-8h es menor que la de ASnS-9h en donde ASnS-4h y ASnS-8h fue de 0.33 V y 0.18 V mientras que ASnS-9h fueron de 0.58 V. En la densidad de potencia máxima, se obtuvo en Geo 1.34×10^{-7} W, comparado con TA304 mostró una potencia máxima de 1.033×10^{-7} W, esto quiere decir que para el caso de TA304 fue menor que Geo. En la densidad de potencia, para los diferentes tratamientos térmicos que se le hicieron, se mostró una potencia máxima de ASnS-4h y ASnS-8h fueron de 2.5×10^{-6} W, y ASnS-9h fue de 5.69×10^{-5} W. En la película de ASnS-9h con depósito y tratamiento térmico se muestra con mayor potencia. En el total voltaje de carga del capacitor para Geo y TA304 muestran un menor voltaje a circuito abierto a comparación de las demás que tienen depósito y tratamiento térmico, para la película ASnS-4h se obtuvo con un voltaje a circuito abierto de 0.7 V a 1 hora manteniendo su voltaje, en la película ASnS-8h obtuvo un voltaje a circuito abierto de 0.8 V en 1 hora manteniendo su voltaje y para la película de ASnS-9h obtuvo un voltaje a circuito abierto de 0.9 V pasando de 1 hora debido al tiempo de depósito y tratamiento térmico que se generó. Se obtuvieron un mayor almacenaje de voltaje en las plantas en serie con las películas de ASnS-4, ASnS-8 y ASnS-9h obteniendo un voltaje a circuito abierto y de mayor potencia de 1.1V pasando a más de 1 hora. Se mostró en serie el depósito en ASnS-4h, ASnS-8h y ASnS-9h horas de SnS, se obtuvieron mayor voltaje después de la hora y se mantiene constante. Se obtuvo la energía almacenada para la planta ASnS-9h, además en serie es mayor en almacenaje de energía. Se demostró la existencia de un cambio en la comunidad microorganismos en los ánodos respecto al suelo. Se mostró el sistema de funcionamiento de las pilas de combustible microbianas en el crecimiento de los microorganismos en la parte del ánodo influyeron en la producción de energía.

REFERENCIAS

1. Nematchoua, M. K., Sadeghi, M., & Reiter, S. (2021). Strategies and scenarios to reduce energy consumption and CO2 emission in the urban, rural and sustainable neighbourhoods. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103053.
2. Saidi, K., & Omri, A. (2020). Reducing CO2 emissions in OECD countries: do renewable and nuclear energy matter. *Progress in Nuclear Energy*, 126, 103425.
3. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>.
4. Zhao, L., Deng, J., Hou, H., Li, J., & Yang, Y. (2019). Investigation of PAH and oil degradation along with electricity generation in soil using an enhanced plant-microbial fuel cell. *Journal of Cleaner Production*.
5. Saxena, V., Tuteja, N. K., & Nangia, U. (2021). Protagonista de las energías renovables en la generación distribuida: una revisión. *Tecnología en Marcha*, 34(4), 3-15.
6. Arias, D., Gavela, P., & Riofrio, J. (2022). Estado del Arte: Incentivos y Estrategias para la Penetración de Energía Renovable. *Revista Técnica" energía"*, 18(2), 91-103.
7. Valla, M. I., Verne, S. A., & Gonzalez, S. A. (2020). Convertidores multinivel: su modulación y control en aplicaciones de generación de energías renovables.
8. Stolarski, M. J., Warmiński, K., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., & Akincza, M. (2020). Bioenergy technologies and biomass potential vary in Northern European countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110238.
9. Chakraborty, I., Ghosh, N., Ghosh, D., Dubey, B. K., Pradhan, D., & Ghangrekar, M. M. (2020). Application of synthesized porous graphitic carbon nitride and it's composite as excellent electrocatalysts in microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(55),

31056-31069.

10. Cullen, D. A., Neyerlin, K. C., Ahluwalia, R. K., Mukundan, R., More, K. L., Borup, R. L., ... & Kusoglu, A. (2021). New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation. *Nature energy*, 6(5), 462-474.
11. Xiao, F., Wang, Y. C., Wu, Z. P., Chen, G., Yang, F., Zhu, S., ... & Shao, M. (2021). Recent advances in electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cells and alkaline membrane fuel cells. *Advanced Materials*, 33(50), 2006292.
12. Jiao, K., Xuan, J., Du, Q., Bao, Z., Xie, B., Wang, B., ... & Guiver, M. D. (2021). Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. *Nature*, 595(7867), 361-369.
13. Li, W., Wang, D., Zhang, Y., Tao, L., Wang, T., Zou, Y., ... & Wang, S. (2020). Defect engineering for fuel-cell electrocatalysts. *Advanced Materials*, 32(19), 1907879.
14. Hren, M., Božič, M., Fakin, D., Kleinschek, K. S., & Gorgieva, S. (2021). Alkaline membrane fuel cells: anion exchange membranes and fuels. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(3), 604-637.
15. Singh, M., Zappa, D., & Comini, E. (2021). Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(54), 27643-27674.
16. Inal, O. B., & Deniz, C. (2020). Assessment of fuel cell types for ships: Based on multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121734.
17. Ji, Q., Bi, L., Zhang, J., Cao, H., & Zhao, X. S. (2020). The role of oxygen vacancies of ABO₃ perovskite oxides in the oxygen reduction reaction. *Energy & Environmental Science*, 13(5), 1408–1428.
18. Mendonça, C., Ferreira, A., & Santos, D. M. (2021). Towards the commercialization of solid oxide fuel cells: recent advances in materials and integration strategies. *Fuels*, 2(4), 393-419.
19. Akram, N., Guo, J., Guo, Y., Kou, Y., Suleman, H., & Wang, J. (2021). Enhanced synergistic catalysis of novel Ag₂O/CuO nanosheets under

- visible light illumination for the photodecomposition of three dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104824.
20. Strik, D., Hamelers, H., Snel, J. y Buisman, C. (2008), Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research* (32), 870-876.
 21. Rusyn, I. B., Medvediev, O. V., & Valko, B. T. (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323-1334.
 22. Rusyn, I. B., Medvediev, O. V., & Valko, B. T. (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323-1334.
 23. Macias, E. V. B., Bajaña, C. L. B., & Mosquera, A. C. (2023). Control de la resistencia antibiótica microbiana mediante procesos de oxidación avanzada, Manta-Ecuador. *Revista ESPAMCIENCIA ISSN 1390-8103*, 14(2), 71-77.
 24. Apollon, W., Luna-Maldonado, A. I., Vidales-Contreras, J. A., Rodríguez-Fuentes, H., Gómez-Leyva, J. F., Kamaraj, S. K., ... & Ortiz-Medina, R. A. (2022). Performance of electrical energy monitoring data acquisition system for plant-based microbial fuel cell.
 25. Moqsud, M. A., & Okamoto, T. (2023). Bioelectricity generation from corn plant microbial fuel cell (PMFC) using natural bamboo charcoal as electrodes and *Shewanella oneidensis*. *Bioresource Technology Reports*, 24, 101611.
 26. Qin, S., Wang, Z., Ren, Y., Yu, Y., Xiao, Y., Chen, J., ... & Yang, H. (2024). A meltblown cloth reinforced partially fluorinated solid polymer electrolyte for ultrastable lithium metal batteries. *Nano Energy*, 119, 109075.
 27. Zhang, Y., Liu, G., Cheng, Y., Xu, J., Wang, C., & Yang, J. (2020). The effects of dry cultivation on grain-filling and chalky grains of upland rice

and paddy rice. *Food and Energy Security*, 9(2), e198.

28. Fan, L., & Feng, W. (2024). Preparation of PANI-SA/CF anode to enhance the remediation and power generation capabilities of plant microbial fuel cells for chromium contaminated soil. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47(4), 509-518.
29. Cheng, C., Hu, Y., Shao, S., Yu, J., Zhou, W., Cheng, J., ... & Zhang, L. (2019). Simultaneous Cr (VI) reduction and electricity generation in Plant-Sediment Microbial Fuel Cells (P-SMFCs): Synthesis of non-bonding Co₃O₄ nanowires onto cathodes. *Environmental Pollution*, 247, 647-657.
30. Das, I., Das, S., & Ghangrekar, M. M. (2020). Application of bimetallic low-cost CuZn as oxygen reduction cathode catalyst in lab-scale and field-scale microbial fuel cell. *Chemical Physics Letters*, 751, 137536.
31. Ayala-Ruiz, D., Castillo Atoche, A., Ruiz-Ibarra, E., Osorio de la Rosa, E., & Vázquez Castillo, J. (2019). A self-powered PMFC-based wireless sensor node for smart city applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019.
32. Yin, H., Ashoori, E., Mu, X., & Mason, A. J. (2019). A compact low-power current-to-digital readout circuit for amperometric electrochemical sensors. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 69(5), 1972-1980.
33. Tahernia, M., Mohammadifar, M., Liu, L., & Choi, S. (2020). A disposable, papertronic three-electrode potentiostat for monitoring bacterial electrochemical activity. *ACS omega*, 5(38), 24717-24723.
34. Salar-García, M. J., Montilla, F., Quijada, C., Morallon, E., & Ieropoulos, I. (2020). Improving the power performance of urine-fed microbial fuel cells using PEDOT-PSS modified anodes. *Applied energy*, 278, 115528.
35. Nath, D., Kiran, P. S., Rewatkar, P., Krishnamurthy, B., Ganesh, P. S., & Goel, S. (2019). Escherichia coli fed paper-based microfluidic microbial fuel cell with MWCNT composed bucky paper

- bioelectrodes. *IEEE Transactions on nanobioscience*, 18(3), 510-515.
36. Osorio de la Rosa, E., Vázquez Castillo, J., Carmona Campos, M., Barbosa Pool, G. R., Becerra Nuñez, G., Castillo Atoche, A., & Ortegón Aguilar, J. (2019). Plant microbial fuel cells–based energy harvester system for self-powered IoT applications. *Sensors*, 19(6), 1378.
 37. Osorio-de-la-Rosa, E., Vazquez-Castillo, J., Castillo-Atoche, A., Heredia-Lozano, J., Castillo-Atoche, A., Becerra-Nuñez, G., & Barbosa, R. (2020). Arrays of plant microbial fuel cells for implementing self-sustainable wireless sensor networks. *IEEE sensors journal*, 21(2), 1965-1974.
 38. Nath, D., Kallepalli, S., Rao, L. T., Dubey, S. K., Javed, A., & Goel, S. (2021). Microfluidic paper microbial fuel cell powered by *Shewanella putrefaciens* in IoT cloud framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(4), 3230-3239.
 39. Souza, A. K. P., de Moraes Cruz, C. A., Marques, G. C., de Castro, L. S. O., & Bezerra, T. B. (2019, August). A compact current conveyor cmos potentiostat circuit for electrochemical sensors. In 2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT) (pp. 1-6). IEEE.
 40. Valdez-Hernández, M., Acquaroli, L. N., Vázquez-Castillo, J., González-Pérez, O., Heredia-Lozano, J. C., Castillo-Atoche, A., ... & Osorio-De-La-Rosa, E. (2022). Plant/soil-microbial fuel cell operation effects in the biological activity of bioelectrochemical systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 2715-2729.
 41. Azri, Y. M., Tou, I., & Sadi, M. (2023). Electrodes materials evaluation in plant microbial fuel cells: a comparison of graphite and stainless steels. *Biofuels*, 1-10.
 42. Mahalingam, S., Ayyaru, S., & Ahn, Y. H. (2021). Facile one-pot microwave assisted synthesis of rGO-CuS-ZnS hybrid nanocomposite cathode catalysts for microbial fuel cell application. *Chemosphere*, 278,

130426.

43. Naveenkumar, M., & Senthilkumar, K. (2021). Microbial fuel cell for harvesting bio-energy from tannery effluent using metal mixed biochar electrodes. *Biomass and bioenergy*, 149, 106082.
44. Lakshmi Ranganatha, V., Pramila, S., Nagaraju, G., Udayabhanu, Surendra, B. S., & Mallikarjunaswamy, C. (2020). Cost-effective and green approach for the synthesis of zinc ferrite nanoparticles using *Aegle Marmelos* extract as a fuel: catalytic, electrochemical, and microbial applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 17386-17403.
45. Bhowmick, G.D., Das, S., Ghangrekar, M.M. et al. Improved Wastewater Treatment by Combined System of Microbial Fuel Cell with Activated Carbon/TiO₂ Cathode Catalyst and Membrane Bioreactor. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 100, 675–682 (2019).
46. Tian, F., Zhong, S., Nie, W., Zeng, M., Chen, B., & Liu, X. (2020). Multi-walled carbon nanotubes prepared with low-cost Fe-Al bimetallic catalysts for high-rate rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Solid-State Electrochemistry*, 24, 667-674.
47. Ahilan, V., Bhowmick, G. D., Ghangrekar, M. M., Wilhelm, M., & Rezwan, K. (2019). Tailoring hydrophilic and porous nature of polysiloxane derived ceramer and ceramic membranes for enhanced bioelectricity generation in microbial fuel cell. *Ionics*, 25, 5907-5918.
48. Ahilan, V., de Barros, C. C., Bhowmick, G. D., Ghangrekar, M. M., Murshed, M. M., Wilhelm, M., & Rezwan, K. (2019). Microbial fuel cell performance of graphitic carbon functionalized porous polysiloxane based ceramic membranes. *Bioelectrochemistry*.
49. Ashmath, S., Kwon, H. J., Peera, S. G., & Lee, T. G. (2022). Solid-state synthesis of cobalt/NCS electrocatalyst for oxygen reduction reaction in dual chamber microbial fuel cells. *Nanomaterials*, 12(24), 4369.
50. Chauhan, S., Kumar, A., Pandit, S., Vempaty, A., Kumar, M., Thapa, B. S., ... & Peera, S. G. (2023). Investigating the performance of a zinc

oxide impregnated polyvinyl alcohol-based low-cost cation exchange membrane in microbial fuel cells. *Membranes*, 13(1), 55.

51. Cai, T., Huang, Y., Huang, M., Xi, Y., Pang, D., & Zhang, W. (2019). Enhancing oxygen reduction reaction of supercapacitor microbial fuel cells with electrospun carbon nanofibers composite cathode. *Chemical Engineering Journal*.
52. Ben Liew, K., Leong, J. X., Wan Daud, W. R., Ahmad, A., Hwang, J. J., & Wu, W. (2019). Incorporation of silver graphene oxide and graphene oxide nanoparticles in sulfonated polyether ether ketone membrane for power generation in microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 227490.
53. Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 402–414.
54. Yan, Z., Jiang, H., Cai, H., Zhou, Y., & Krumholz, L. R. (2015). Complex Interactions Between the Macrophyte *Acorus Calamus* and Microbial Fuel Cells During Pyrene and Benzo[a]Pyrene Degradation in Sediments. *Scientific Reports*, 5(1).
55. Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81–89.
56. Putranto, A., Sugiarto, Y., Kusumarini, N., Wiranti, T. y Normalasari, L. (2018). The effect of urea fertilizer and electrode gaps toward the voltaje of plant microbial fuel cell base on *Oryza sativa*. *Jurnal Teknologi Pertanian* (19), 43-50.
57. Shaikh, R., Rizvi, A., Quraishi, M., Pandit, S., Mathuriya, A. S., Gupta, P. K., ... Prasad, R. (2020). Bioelectricity production using plant-microbial fuel cell: Present state of art. *South African Journal of Botany*.
58. Sindhuja, M., Padmapriya, S., Sudha, V., & Harinipriya, S. (2019). Phase specific α -MnO₂ synthesis by microbial fuel cell for

- supercapacitor applications with simultaneous power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(11), 5389-5398.
59. Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., & Al-Zaqri, N. (2023). A pilot trial in the remediation of pollutants simultaneously with bioenergy generation through microbial fuel cell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110643.
 60. Zhang, Y., Liu, M., Zhou, M., Yang, H., Liang, L., & Gu, T. (2019). Microbial fuel cell hybrid systems for wastewater treatment and bioenergy production: synergistic effects, mechanisms and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 13-29.
 61. Cahyani, D., Haryanto, A., Marpaung, D. S., & Fil'aini, R. (2020). Plant Microbial Fuel Cell (P-MFC) as electricity source; working principle, working principle, design variations, potential and challenge.
 62. Mohyudin, S., Farooq, R., Jubeen, F., Rasheed, T., Fatima, M., & Sher, F. (2022). Microbial fuel cells a state-of-the-art technology for wastewater treatment and bioelectricity generation. *Environmental research*, 204, 112387.
 63. Shrivastava, A., & Sharma, R. K. (2022). Lignocellulosic biomass based microbial fuel cells: Performance and applications. *Journal of Cleaner Production*, 361, 132269.
 64. Santamaría, M. I. R., Cabrera, D. T., Santiago, A. I. L., Trejo, J. P., García, M. S., & Navarrete, A. M. (2023). Impacto del cambio climático sobre la fotosíntesis, fotorrespiración y respiración de plantas C3. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 9(Especial), 6-11.
 65. Santamaría, M. I. R., Cabrera, D. T., Santiago, A. I. L., Trejo, J. P., García, M. S., & Navarrete, A. M. (2023). Impacto del cambio climático sobre la fotosíntesis, fotorrespiración y respiración de plantas C3. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 9(Especial), 6-11.
 66. Bao, Y., He, J., Song, K., Guo, J., Zhou, X., & Liu, S. (2021). Plant-extract-mediated synthesis of metal nanoparticles. *Journal of*

Chemistry, 2021(1), 6562687.

67. Jeevanandam, J., Kiew, S. F., Boakye-Ansah, S., Lau, S. Y., Barhoum, A., Danquah, M. K., & Rodrigues, J. (2022). Green approaches for the synthesis of metal and metal oxide nanoparticles using microbial and plant extracts. *Nanoscale*, 14(7), 2534-2571.
68. Siddiqui, A. J., Jahan, S., Singh, R., Saxena, J., Ashraf, S. A., Khan, A., ... & Adnan, M. (2022). Plants in anticancer drug discovery: from molecular mechanism to chemoprevention. *BioMed Research International*, 2022(1), 5425485.
69. Jiang, G., Senthil, R. A., Sun, Y., Kumar, T. R., & Pan, J. (2022). Recent progress on porous carbon and its derivatives from plants as advanced electrode materials for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 520, 230886.
70. Sarangi, V., Agrawal, S., & Sanyal, P. (2021). The disparity in the abundance of C4 plants estimated using the carbon isotopic composition of paleosol components. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 561, 110068.
71. Yang, X., Liu, Y., Yuan, G., Weston, D. J., & Tuskan, G. A. (2024). Engineering crassulacean acid metabolism in C3 and C4 plants. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 16(4), a041674.
72. Li, K., Liu, Q., Cheng, H., Hu, M., & Zhang, S. (2021). Classification and carbon structural transformation from anthracite to natural coaly graphite by XRD, Raman spectroscopy, and HRTEM. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 249, 119286.
73. Jiang, J., Zhang, S., Longhurst, P., Yang, W., & Zheng, S. (2021). Molecular structure characterization of bituminous coal in Northern China via XRD, Raman and FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 255, 119724.
74. Surekha, G., Krishnaiah, K. V., Ravi, N., & Suvarna, R. P. (2020, March). FTIR, Raman and XRD analysis of graphene oxide films prepared by modified Hummers method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol.

1495, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.

75. Shi, D., & Maydeu-Olivares, A. (2020). The effect of estimation methods on SEM fit indices. *Educational and psychological measurement*, 80(3), 421-445.
76. Yuan, K. H., & Deng, L. (2021). Equivalence of partial-least-squares SEM and the methods of factor-score regression. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 28(4), 557-571.
77. García, A. V., Vásquez, E. V., & Pabón, M. J. G. (2023). Producción de energía eléctrica a partir de sistemas bioelectroquímicos usando agua y lodo de fuente natural en celdas de combustibles microbianas sedimentarias. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
78. Solana Andreu, L. (2023). *Estudio de la influencia del diseño de una MEA y de las condiciones de operación sobre su curva de polarización* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
79. Serra, P. M. D., Espírito-Santo, A., & Magrinho, M. (2020). A steady-state electrical model of a microbial fuel cell through multiple-cycle polarization curves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109439.
80. Arias, D. A. (2020). Multiobjective Optimization of the Active and Reactive Power to PQ curve of the Power System Bus Optimización Multi-objetivo de Potencia Activa y Reactiva para crear la Curva PQ en las Barras del SEP.
81. Chen, M., Zhang, Y., Xing, G., Chou, S. L., & Tang, Y. (2021). Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions. *Energy & Environmental Science*, 14(6), 3323-3351.