POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE SOLAR MICROBIANA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y EL TRATAMIENTO DE AGUA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

EN LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. MARÍA CATALINA VEGA REYES

DIRECTOR

DR. CARLOS ANTONIO PINEDA ARELLANO

CO-DIRECTOR

DR. SATHISH KUMAR KAMARAJ



AGUASCALIENTES, AGS, JUNIO, 2021.

Página 1 de 99

El presente trabajo de tesis se realizó en el CIO (Centro de Investigaciones en Óptica-Unidad Aguascalientes) bajo la dirección de los doctores Carlos Antonio Pineda Arellano y Sathish Kumar Kamaraj. Se presta a consideración de las autoridades del Centro de Investigaciones en Óptica con objeto de acceder al grado académico de Maestro en Ciencias y Tecnología, con la opción terminal de Ingeniería Ambiental.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba. De igual forma agradecer a mi co-tutor el Dr. Sathish Kumar Kamaraj, que me apoyo con sus conocimientos para llevar a cabo este proyecto y no solo eso, también con sus consejos de vida siendo mi asesor desde la licenciatura.

También quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Iván Salgado Tránsito y al Dr. Diego Xavier Del Jesús González Quijano, por formar parte de mi comité tutorial, dando seguimiento cada cuatrimestre al proyecto, con sus preguntas y observaciones, siempre objetivos y tratando de formarme como una mejor maestra.

Extiendo mis más grandes agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme con una beca N° 932092 durante mis estudios de posgrado, de no ser por dicho apoyo no hubiera sido posible este proyecto.

Agradecer al proyecto de CONACYT Atención a Problemas Nacionales 1651 por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su ayuda.

Agradezco de igual forma a todo el personal del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por su apoyo, específicamente al Dr. Juan Margarito Sarabia Torres por el apoyo técnico en la elaboración de las celdas, y a María Cristian Albor Cortes por el apoyo en el análisis SEM de las películas de TiO₂.

De igual forma agradezco a la Universidad Politécnica de Aguascalientes (UPA) y a su personal, como el Dr. Víctor Arturo Maldonado Ruelas, por permitirme realizar unos experimentos en su laboratorio, de no ser por su apoyo no hubiera podido finalizar mi experimentación. Igualmente agradecer al Mtro. Juan Fernando Aguirre Sámano por apoyarme en la recolección del agua residual de la planta de tratamiento de aguas de la UPA.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros, novio y a mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero hacer mención de mis padres, que siempre estuvieron ahí apoyándome a su manera.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

En este proyecto se plantea estudiar la propuesta de una Celda de Combustible Microbiana que tenga en la cámara anódica un fotoánodo, la cual es nombrada como Celda de Combustible Solar Microbiana. Esta celda es capaz de degradar compuestos orgánicos y producir constantemente electrones fotogenerados que pueden pasar directamente a través del circuito externo al cátodo para la producción de electricidad. Simultáneamente estará operando la CCM creando energía para la celda en forma de Adenosín Trifosfato mejor conocido como ATP.

El fotoánodo fue construido sobre un vidrio conductor de óxido de estaño dopado con flúor, por medio del método de Dip-Couting, fue depositado en el vidrio conductor TiO₂ con Etil-Celulosa a diferentes concentraciones y se estudió el efecto del espesor con respecto a la transmitancia óptica. Las películas fueron analizadas por medio de Espectroscopia UV-Vis y con un Potenciostato-Galvanostato, también fueron analizadas mediante Microscopio Electrónico de Barrido.

Las Celda de Combustible Microbiana, Celda de Combustible Solar Microbiana Celda de Combustible Fotocatalítica fueron la caracterizadas V electroquímicamente, para conocer su desempeño en la generación de energía eléctrica. Las pruebas realizadas a las Celda de Combustible Fotocatalítica y la Celda de Combustible Solar Microbiana, fueron sometidas con presencia y ausencia de la lampara de xenón. Por último, se realizaron pruebas de calidad del agua a la muestra iniciales y finales. Con los resultados obtenidos se demostró el prototipo propuesto podría ser una muy buena opción de celda de combustible alternativa, por su alta eficiencia y desempeño.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIN	/IENTOS	
RESUMEN .		5
ÍNDICE DE F	-IGURAS O GRÁFICAS	9
CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	
1.1	ANTECEDENTES	14
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.3.	JUSTIFICACIÓN	16
1.4.	OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4.1.	Objetivo general:	
1.4.2.	Objetivos específicos:	
1.5.	HIPÓTESIS	17
CAPÍTULO 2	2 MARCO TEÓRICO	
2.1.	FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA.	18
2.1.1.	Biopelícula	
2.1.2.	Sustrato	
2.1.3.	Membrana	
2.1.4.	Ánodo	
2.1.5.	Cátodo	
2.1.6.	Ventana óptica	
2.1.7.	Degradación de sustratos por medio del fotoánodo	
2.1.8.	Dip-coating	
2.1.9.	Método Sol-Gel	
2.1.10). Procesos fotolíticos	
2.1.11	. Radicales Hidroxilo('OH)	
CAPÍTULO 3	B MÉTODO O PROCEDIMIENTO	
3.1.	RESUMEN CAPÍTULO 3	41
3.2.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	43
3.2.1.	Construcción de la Membrana de Intercambio Protónico	
3.2.2.	Construcción del Ánodo	
3.2.3.	Construcción del Cátodo	
3.2.4.	Preparación de Película de Dióxido de Titanio con Etil Celulosa	
3.2.5.	Corte de Vidrios Conductores	50

3.2.6.	Depósitos de Sol-Gel de TiO ₂	50
3.2.7.	Colocación de cable conductor al circuito externo	52
3.3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS PELÍCULAS DE TIO₂ A DIFERENTES	
CONCEN	ITRACIONES DE ETIL-CELULOSA	54
3.4.	RECOLECCIÓN DE AGUA RESIDUAL	56
3.5.	PRUEBAS DE CALIDAD DEL AGUA	57
3.6.	PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS A LA CELDA	58
3.7. EQU	JIPOS Y REACTIVOS	64
3.7.1.	Espectrofotómetro UV-VIS Thermo Scientific Evolution 201	64
3.7.2.	Embudo de filtración magnético	65
3.7.3.	Medidor de pH y conductividad/TDS portátil	65
3.7.4.	Viales de digestión para DQO de alto rango	66
3.7.5.	Reactor de digestión para DQO	66
3.7.6.	Espectrofotómetro de mesa	67
3.7.7.	Carbono Orgánico Total	67
3.7.8.	Potenciostato/Galvanostato	68
3.7.9.	Fuente de iluminación	68
CAPÍTULO 4	RESULTADOS	69
4.1. DISE	EÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CCSM	69
4.2. DISC	CUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PELÍCULAS DE TIO₂ A DIFERENTES	
CONCEN	ITRACIONES DE ETIL-CELULOSA.	70
4.2.1. difere	Discusión de los resultados de transmitancia UV-VIS de las Películas de TiO ₂ ntes concentraciones de Etil-Celulosa	а 70
4.2.2. TiO₂ c	Discusión de los resultados de pruebas Electroquímicas de las Películas de on Etil-Celulosa	71
4.2.3. Etil-Ce	Discusión de Imágenes SEM de las Películas de TiO₂ a concentración de 2.09 elulosa.	% 74
4.3. DIS(CUSIÓN DE RESULTADOS ELECTROQUÍMICOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE 76	
4.3.1. la CC	Discusión de los resultados de Voltaje de la Descarga Galvanostatica (VDG) o SM	de 81
4.4. DISC	CUSIÓN DE RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA DE LAS CELDAS DE	
COMBU	STIBLE SOLAR MICROBIANA	83
CONCLUSIC	DNES	85
RECOMEND	DACIONES	87

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS	91
GLOSARIO	91

ÍNDICE DE FIGURAS O GRÁFICAS

Ilustración 1: Esquema representativo del funcionamiento de una Celda de	
	18
ilustración 2: Mecanismos con transportadores para la transferencia de electrone	25 21
ue microorganismos. Modificado de Rumar et al., 2015	2 I
transferencias de electrones de largo alcance en una bacteria. Modificado de	у
M at al. 2018	າງ
Ilustración 4 [.] Representación esquemática de la reducción simultánea de	22
desechos y la generación de electricidad en una celda de combustible microbian	а
empleando organismos fotosintéticos en el ánodo. Modificado de Joseph M. et al	с, I
2018.	26
Ilustración 5: Ánodo de Fieltro de grafito	29
Ilustración 6: Cátodo airado de malla de acero inoxidable con MnOx	30
Ilustración 7: Ventana de plexiglass	32
Ilustración 8: Fotoánodo de TiO2 con Etil Celulosa al 2%, sobre vidrio conductor o	de
FTO	34
Ilustración 9: Procesos de inmersión, deposición y drenaje de la técnica de dip-	
coating, b) variación continúa de la técnica de dip-coating modificado de Ahmad,	
Pandey, & Rahim, 2017	37
Ilustración 10: Funcionamiento de la Celda de Combustible Solar Microbiana	39
Ilustración 11: Esquema ilustrativo de las partes esenciales y los materiales de la	1
Celda de Combustible Solar Microbiana.	41
Ilustración 12: Diseño en SolidWorks de Celda de Combustible Solar Microbiana.	
	42
Ilustración 13: Membranas de Intercambio Protonico de barro.	43
Ilustración 14. Intagen ilustrativa de colocación de la membraria en el sistema	44 15
Ilustración 16: A) Solvente de tinta en parrilla de agitación B) Solvente al finaliza	40 r
agitación	46
Ilustración 17 [.] MnOx v Solvente pesados	47
Ilustración 18: A) Área de trabajo del cátodo donde se coloca la tinta. B) Cátodo	
con tinta va colocada	47
Ilustración 19: Goteo del Sol-Gel	49
Ilustración 20: Medidas de vidrio conductor para fotoánodo.	50
Ilustración 21: Vidrio conductor con área de trabajo delimitada por cinta Kapton.	50
Ilustración 22: Inmersiones de vidrios conductores en TiO2 con Etil Celulosa, en	
dispositivo Dip coating	51
Ilustración 23: Fotoánodos de TiO ₂ con Etil Celulosa.	52
Ilustración 24: Colocación de tinta conductiva de Plata.	52
Ilustración 25: Fotoánodos con Caimán.	52
Ilustración 26: Colocación de aislante liquido dieléctrico anticorrosivo sobre	
Fotoanodos.	53

Ilustración 27: Prototipo de Celdas de Combustible Solar Microbiano	53
Ilustración 28: Análisis electroquímicos al fotoánodo	55
Ilustración 29: Procedimiento de preparación y caracterización de Fotoánodos	56
Ilustración 30: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad	
Politécnica de Aguascalientes	56
Ilustración 31: Recolección de Agua Residual en el Rio San Pedro.	57
Ilustración 32: Esquema de las pruebas de calidad de agua realizadas a la Celda	а
de Combustible Solar Microbiana	58
Ilustración 33: Esquema representativo de conexión en la Caracterización	
electroquímica de la Celda de Combustible Microbiana	59
Ilustración 34: Esquema representativo de conexión en la Caracterización	
electroquímica de la Celda de Combustible Solar Microbiana.	59
Ilustración 35: Esquema representativo de conexión de la cámara anódica de la	
caracterización electroquímica con electrodo de Calomel de la Celda de	
Combustible Solar Microbiana	60
Ilustración 36:Esquema representativo de conexión de la caracterización	
electroquímica de la Celda de Combustible Fotocatalítica	61
Ilustración 37: Esquema representativo de conexión para la caracterización	
electroquímica de la cámara anódica con electrodo de referencia de la Celda de	
Combustible Fotocatalítica.	62
Ilustración 38: Caracterización electroquímica de Celda de Combustible	
Microbiana en Potenciostato Galvanostato (SP-300 Biologic).	63
Ilustración 39: Espectrofotómetro UV-VIS Thermo Scientific Evolution 201	65
Ilustración 40: Embudo de filtración magnético marca Pall Life Sciences	65
Ilustración 41:Medidor de pH y conductividad/TDS portátil HACH - HQ30D -	
53101201	65
Ilustración 42: Viales de digestión para DQO, rango alto plus, de 200 a 15 000	
mg/L de DQO.	66
Ilustración 43:Reactor de digestión para DQO doble block Hach DRB200	66
Ilustración 44:Espectrofotometro De Mesa Hach (S/RFID).	67
Ilustración 45: Analizador de carbono orgánico total por oxidación catalítica TOC	;-L
	67
Ilustración 46:Potenciostato/Galvanostato marca BioLogic® utilizado en pruebas	;
	68
Ilustracion 47: Fuente de Iluminacion (Lampara XE 75W Neport®, Carcasa para	
Iamparas de arco 50-250 W y Fuente de alimentación universal (40-200 W)	~~
	68
Ilustración 48: A) CCSINI Irradiada por la fuente de lluminación (Lampara XE 75V	V
neporty. Esquerria representativo de la Celda construída que puede tuncionar	60
Ullillo D) UUSIVI, U) UUVI, U) UUF.	09
haio la curva de Películas de Ti Ω_0 en función a la concentración de Etil Coluloca	a
	י. 71
	11

Ilustración 50: Voltamperometría de barrido lineal (LSV por sus siglas en inglés); A) Concentración de 2.0% de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO ₂ ; B) Concentración de 2.5% de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO ₂
2.5%
Ilustración 53:Voltaje de Circuito Abierto en distinta concentración de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO ₂ : A) Etil-Celulosa al 2.0%, B) Etil-Celulosa al 2.5% 74 Ilustración 54:Imágenes SEM de películas de TiO ₂ con Etil-Celulosa al 2.0%. (A) Partículas de TiO ₂ . (B) Grosor de película de TiO ₂ con Etil-Celulosa
Ilustración 56: Curva de Polarización de Celda de Combustible Fotocatalítica A y B, sin estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport) 77 Ilustración 57: Curva de Polarización de Celda de Combustible Solar Fotocatalítica A y B, con estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport). 79 Ilustración 58: Curva de Polarización de Celda de Combustible Solar Microbiana A y B, sin estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport) 80 Ilustración 59: Curva de Polarización de Celda de Celda de Combustible Solar Microbiana A y B, con estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport) 80 Neport)
Ilustración 60: Descarga de Voltaje a Circuito Abierto de Celda de Combustible Fotovoltaica A y B, sin estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport), cámara anódica – Descarga Galvanostática a diferentes corrientes (ipulse) desde 1 mA hasta 45 mA en 10 s, hasta descarga completa del voltaje de la celda a 0V
Ilustración 61: Descarga de Voltaje a Circuito Abierto de Celda de Combustible Solar Microbiana A y B, con estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport), cámara anódica – Descarga Galvanostática a diferentes corrientes (ipulse) desde 1 mA hasta 45 mA en 10 s, hasta descarga completa del voltaje de la celda a 0V

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la tecnología de Celdas de Combustible Microbianas (CCM) ha captado la atención de la comunidad científica por la posibilidad de transformar los desechos orgánicos directamente en electricidad a través de reacciones electroquímicas catódicas, anódicas y microbianas / enzimáticas / abióticas microbianas catalizadas (Santoro et al., 2017). Se dice que la energía requerida para el tratamiento de aguas residuales municipales se puede recuperar hasta 10 veces (Yasri N. et al., 2019). Por otro lado, los problemas más críticos que afronta la sociedad actual son la crisis energética y la generación de agua contaminada (Revelo et al., 2013). La contaminación ambiental y la crisis energética tienen impactos significativos en nuestro medio ambiente (Wang et al., 2014), se han convertido en recientes preocupaciones las enormes cantidades de desechos orgánicos que se descargan en los cuerpos de agua, causando una grave contaminación acuática, y también aumentando el consumo de energía para la descontaminación de aguas contaminadas (M. Li et al., 2019). La recuperación de energía de las aguas residuales con estos desechos orgánicos, es un enfogue prometedor para mitigar estos dos problemas simultáneamente. Los compuestos orgánicos en las aguas residuales, como los carbohidratos, los ácidos grasos y los aminoácidos, almacenan una considerable cantidad energía guímica (Wang et al., 2014). Alternativamente, los compuestos orgánicos en las aguas residuales pueden servir como fuentes de carbono y energía que pueden reutilizarse (M. Li et al., 2019).

Las aguas residuales contienen una tremenda energía potencial, que es aproximadamente 10 veces mayor que la energía requerida para el tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, muchos investigadores han estudiado cómo extraer la energía de las aguas residuales y eliminar simultáneamente los contaminantes (Tian et al., 2020). Los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales tienen la principal desventaja de ser métodos de transferencia de fase, que requieren tratamiento o eliminación posterior. Por otro lado, los tratamientos biológicos (que son destructivos) toman mucho tiempo para que el efluente alcance los estándares requeridos y produzca una gran cantidad de lodos, que normalmente no puede reutilizarse (Bergamini et al., 2009) además de que los biorreactores

requieren una gran cantidad de energía. En el tratamiento tradicional de aguas residuales, los contaminantes orgánicos se oxidan a CO₂ y pequeños compuestos orgánicos moleculares con electrones liberadores. En la mayoría de los procesos, los electrones no se recogen para el uso de electricidad (Tian et al., 2020). Es imperativo desarrollar enfoques sostenibles que puedan degradar simultáneamente estos contaminantes orgánicos y recuperar su energía química. Un diseño exitoso para cumplir con estos requisitos es el uso de CCM, que se consideran un enfoque prometedor para el tratamiento de aguas residuales (M. Li et al., 2019).

La CCM se propone como una tecnología candidata para lograr el tratamiento de aguas residuales y la producción simultánea de electricidad (Wang et al., 2014, Revelo et al., 2013). La mayor ventaja de las CCM radica en el uso de aguas residuales como sustrato (combustible), que rompe el concepto tradicional de tratamiento de aguas residuales y permite combinar esto con la generación de electricidad (M. Li et al., 2019). Tener un mayor rendimiento de las CCM por medio de los electrodos (ánodo y cátodo) con base en la mejora de los materiales es principal objetivo en la última década para los científicos alrededor del mundo entero (Santoro et al., 2016). Y aunque esta tecnología es emergente hay interesantes aplicaciones para estudiar a futuro tales como la bioelectrosíntesis y la reducción biocatalítica del CO₂ (Revelo et al., 2013). Por lo tanto, combinar la tecnología fotocatalítica puede proporcionar una solución prometedora para abordar estas limitaciones existentes de los sistemas CCM convencionales. Entre ellos, las tecnologías fotocatalíticas basadas en semiconductores están ganando una creciente aceptación como una opción efectiva y prometedora, gracias a sus características deseables como la inercia química, alta estabilidad, bajo costo, alta eficiencia y baja toxicidad (M. Li et al., 2019).

Amplios estudios sugieren que la generación y el transporte de electrones en el ánodo microbiano es el paso limitante para un sistema CCM. Si se complementa el ánodo microbiano de CCM con un fotoánodo de alto rendimiento (p. Ej., TiO₂), el proceso lento y complejo de transferencia de electrones bioquímicos en las CCM tradicionales puede complementarse con un proceso de transporte más rápido y

directo de electrones fotogenerados en la fotocatálisis (M. Li et al., 2019). En los últimos años, los fotoánodos de respuesta de luz visible, como WO₃ / W, BiOBr / Ti, CdS / TiO₂, etc., reciben más atenciones debido a la excelente utilización de la energía solar (Bai at el., 2016). En adición el proceso fotocatalítico es capaz de degradar compuestos orgánicos en el fotoánodo, y produce constantemente electrones fotogenerados que pueden pasar directamente a través del circuito externo al cátodo para la producción de electricidad (o hidrógeno) (M. Li et al., 2019).

1.1ANTECEDENTES

En una CCM, los microorganismos degradan (oxidan) la materia orgánica, produciendo electrones que viajan a través de una serie de enzimas respiratorias en la célula y producen energía para la célula en forma de ATP. Luego, los electrones se liberan a un Aceptor de Electrones Terminal (TEA) que acepta los electrones y se reduce. Por ejemplo, el oxígeno se puede reducir al agua a través de una reacción catalizada de los electrones con los protones. Muchos TEA como oxígeno, nitrato, sulfato y otros se difunden fácilmente en la célula donde aceptan (Logan, 2007)

Los estudios que iniciaron el interés en el campo de la bioelectricidad y electroquímica fueron inspirados por Luigi Galvani (1737-1798), un médico italiano y también físico, quién descubrió que los tejidos de las ranas están dotados de electricidad intrínseca, lo que demuestra la existencia de electricidad animal. Mostró que tocar el músculo de la extremidad de la rana simultáneamente con dos metales diferentes e interconectados causó su contracción. Es cierto que no se refería a la electricidad de los tejidos, sino a la corriente causada por el contacto de los metales con la humedad (Hai-Liang et al., 2019) (Czerwińska-Główka et al., 2020) (Santoro et al., 2017). La idea original de utilizar microbios para generar electricidad fue concebida y atribuida a Potter en 1911 (Santoro et al., 2017), pero se lograron muy pocos avances en el campo (Logan, 2007). A principios de la década de 1990, las pilas de combustible se volvieron de mayor interés y los trabajos comenzaron a aumentar (Allen y Bennetto, 1993). Los experimentos con mayor éxito fueron los que se llevaron a cabo con el uso de mediadores químicos o también conocidas como lanzaderas de electrones, son aquellos que pueden transportar los electrones

del interior de la celda a los exo-electrodos. Sin embargo, el gran avance en las CCM ocurrió en 1999, cuando se reconoció que los mediadores químicos no es necesario que sean añadidos (Kim et al., 1999). Las primeras investigaciones de catalizadores se realizaron en los años 60 y más recientemente en los años 80-90, con el trabajo de Bennetto et al. que resultó en el desarrollo del llamado "CCM analítica" que todavía está en uso hasta la fecha (Santoro et al., 2017). El concepto de diseño actual de CCMsurgió en 1977 con el trabajo de Karube et al. (1977). Sin embargo, se sabía poco sobre cómo fecundaban las CCM en ese momento. En 1999, Kim et al. encontró con éxito el uso de CCM, para la generación de electricidad, fue considerado un hito en el desarrollo de CCM (Hai-Liang et al., 2019). A partir de esos primeros ejemplos, ya se ha logrado un progreso significativo en la comprensión de los mecanismos de transferencia de electrones, el desarrollo de interfaces bio-electrocatalíticas eficientes y el desarrollo de materiales de electrodos novedosos, de bajo costo y duraderos, pero no obstante hay un amplio margen para mejorar y trabajar antes de llegar a la industrialización de las CCM. A partir del ánodo, se han realizado progresos notables con sustratos sintéticos y catalizadores microbianos modelo o consorcios microbianos desarrollados en el laboratorio. Como ejemplo, se han utilizado varios tipos de desechos orgánicos como combustible para los ánodos microbianos, pero la cinética de las bacterias electroactivas sigue siendo pobre y la interacción entre el electrodo y las bacterias aún no se ha entendido completamente (Santoro et al., 2017).

La atracción de las CCM hacia los electrodos, la formación de biopelículas y el desarrollo en la superficie del ánodo, la interacción y la cooperación entre especies, así como la influencia de los parámetros ambientales en la colonización microbiana, siguen siendo desconocidos debido a la dificultad de acoplar los complicados procesos de la electroquímica microbiana y la tecnología de imagen existente (Santoro et al., 2017). La actividad eléctrica de la biopelícula fue demostrada claramente por Masi et al., 2015 en un sistema de Matriz de Electrodos Múltiples (MEA) equipado con 59 microelectrodos, lo que permitió una alta resolución espacio-temporal (Czerwińska-Główka et al., 2020). Durante los últimos años, los

investigadores han trabajado mucho para demostrar que la biopelícula juega un papel importante en la reducción de oxígeno (Hai-Liang et al., 2019).

En el cátodo, el oxígeno se ha utilizado principalmente como oxidante debido a su abundancia y alto potencial de reducción. Algunos estudios también mostraron la posibilidad de utilizar oxidantes metálicos (p. Ej., U, Cd, Cr, Cu, etc.) que pueden reducirse a un estado de oxidación menos tóxico. La Reacción de Reducción de Oxígeno (ORR) sigue siendo uno de los principales cuellos de botella de esta tecnología, debido a los altos potenciales excesivos y la baja cinética que se encuentran. Las celdas de combustible biológico se hicieron populares en la década de 1960, cuando la NASA mostró interés a corto plazo en convertir los desechos orgánicos en electricidad en misiones espaciales (Santoro et al., 2017).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De ambas, las Celdas de Combustible Fotocatalíticas (CCF) y las Celdas de Combustible Microbiana (CCM) se puede obtener energía eléctrica mediante la oxidación de contaminantes orgánicos. Las CCM necesitan un tiempo de arranque antes de la operación y tiempo de recuperación después de la operación, mientras que, en las CCF, no se presentan dicho inconveniente. Sin embargo, la generación de energía por CCF sigue siendo limitada debido a la recombinación de electrones y huecos fotoinducidos (Tian et al., 2020). Para abordar estás problemáticas se plantea el desarrollar una celda que cuente con estas dos tecnologías.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las CCM son atractivos dispositivos bioelectroquímicos usados para producir energía eléctrica de la materia orgánica presente naturalmente en el ambiente o en el agua contaminada (R. Kumar et al., 2015). Las CCM son un de los más novedosos enfoques en la generación de electricidad-bioelectricidad a partir de biomasa mediante bacterias (Logan, 2007). Cuando se usan para la producción de energía depende electroquímicamente de microrganismos activos que actúan como biocatalizadores, oxidando sustratos, orgánicos e inorgánicos, en dióxido de carbono y en la generación de electrones en el ánodo y químicamente reduciendo el cátodo (R. Kumar et al., 2015). Por tal motivo con la presente investigación se pretende explorar la manera en la que se genera energía eléctrica obtenida directamente de aguas residuales incorporando un componente que perita aprovechar simultáneamente la energía solar.

1.4. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.4.1. Objetivo general:

• Proponer un prototipo que permita llevar a cabo el tratamiento de agua residual y la generación de energía eléctrica simultáneamente, mediante el aprovechamiento de energía solar.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Diseñar una Celda Solar Microbiana que permita evaluar el desempeño combinado de un fotoánodo y un ánodo microbiano alternativamente.
- Construir un prototipo de Celda Solar Microbiana a nivel laboratorio.
- Caracterizar y evaluar los componentes y de la Celda Solar Microbiana construida.
- Analizar y discutir los resultados.

1.5. HIPÓTESIS

El desarrollo de una celda solar microbiana, utilizando el TiO₂ como catalizador en la cámara anódica, podría mejor el desempeño de tratamiento de agua residual y la generación de energía eléctrica, gracias a la estimulación del TiO₂ por la luz UV proveniente sol.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

Una CCM es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando, bajo ciertas condiciones, algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno) (Revelo et al., 2013). Debido a su alto potencial redox (+1.229 V) y su bajo costo de suministro, el oxígeno es el aceptor de electrones terminal más popular. Los microorganismos transfieren directamente los electrones del ánodo al oxígeno o ayudan a la oxidación de los compuestos de metales de transición para el suministro de electrones al oxígeno (Hai-Liang et al., 2019). Las celdas degradan los compuestos orgánicos y los electrones generados en el proceso se transfieren directa o indirectamente con la ayuda de mediadores al electrodo y luego viajan a la cámara del cátodo a través del circuito externo (Yasri N. et al., 2019). En la ilustración 1, se presenta un esquema que representa el principio de funcionamiento de la CCM de dos cámaras, la anódica y la catódica, las cuales se encuentran divididas por una membrana, puede ser Membrana de Intercambio Protónico (PEM por sus siglas en inglés) o Membrana de Intercambio Catiónico (CEM por sus siglas en inglés).



Membrana

Ilustración 1: Esquema representativo del funcionamiento de una Celda de Combustible Microbiana.

Las CCM se pueden considerar como sistemas bioelectroquímicos capaces de generar energía eléctrica basadas en la explotación de reacciones biocatalíticas con celdas microbianas activas. En las CCM que generan energía, los electrones se liberan de los sustratos a través de biocatalizadores en un ánodo (Rosenbaum et al., 2010), creando energía para la celda en forma de ATP, que es Trifosfato de Adenosina (Molécula orgánica formada por carbono, hidrógeno y oxígeno, fundamental en la obtención de energía).

El mecanismo de transferencia de electrones biológicos no está completamente claro (Hai-Liang et al., 2019). Pero se conoce que los electrones son transmitidos al aceptor de electrones (TEA: Entidad química capaz de recibir electrones que son transferidos desde otro compuesto, el agente oxidante, que al aceptar electrones se reduce), por ejemplo, el oxígeno que puede ser reducido con el agua a través de una reacción catalítica de los electrones con los protones. Varios TEA como el oxígeno, el nitrógeno, sulfato y otros fácilmente se difunden dentro de la celda donde los electrones son aceptados formando productos que pueden ser difundidos fuera de la celda (Logan, 2007).

Los microorganismos exoelectrogénicos (Logan, 2009) son especies bioelectrocatalíticamente activas que crecen en la CCM y transfieren electrones al puerto anódico sin la necesidad de mediadores exógenos (Yasri N. et al., 2019). El electrón producido es transmitido a la superficie del ánodo, pero los protones generados deben pasar a través de la membrana de intercambio de protones (PEM) en orden para llegar al compartimiento del cátodo (Rahimnejad M. et al., 2014). Un aumento de potencia en la CCM representa un mayor voltaje, y la resistencia equivalente en serie disminuye (Santoro et al., 2016).

Se sabe que algunas bacterias pueden transferir electrones afuera del sistema de la celda por un aceptor de electrones, como un metal oxidado por el óxido de hierro. Estas bacterias pueden exogenadamente transferir electrones llamados exoelectrógenos, que pueden ser usados para producir voltaje en la CCM (Logan, 2007). La producción de bioelectricidad por comunidades microbianas puras o mixtas depende de la arquitectura del sistema y del entorno fisicoquímico, como la resistencia interna del sistema, el tamaño del electrodo, el espaciado del electrodo, la conductividad y el pH, etc (Yasri N. et al., 2019).

Varios de los parámetros que afectan el rendimiento de las CCM y la generación de bioelectricidad, conocidos son, inóculos microbianos, sustratos químicos, masa transferida por área, ausencia o existencia de materiales de intercambio protónico, mecanismo de transferencia de electrones a la superficie del ánodo, la resistencia interna y externa de la celda, solución de fuerza iónica, materiales de electrodos y el espacio entre electrodos (Rahimnejad M. et al., 2014). Pero los parámetros que influyen en los sobrepotenciales son la superficie del electrodo, las características electroquímicas del electrodo, el potencial del electrodo y la cinética junto con el mecanismo de transferencia de electrones y la corriente de la CCM (Hai-Liang et al., 2019). El rendimiento de la CCM en la generación de energía, y la transferencia de electrones microbianos, (ii) El metabolismo de la celda, (ii) la transferencia de electrones microbianos, (iii) la transferencia de protones por medio de la membrana de intercambio, (iv) las resistencias externas e internas y (v) oxidación catódica (Rahimnejad M. et al., 2014).

La producción de bioelectricidad por comunidades microbianas puras o mixtas depende de la arquitectura del sistema y del entorno fisicoquímico, como la resistencia interna del sistema, el tamaño del electrodo, el espaciado del electrodo, la conductividad y el pH, etc (Yasri N. et al., 2019). La temperatura no cambia mucho durante el flujo de corriente. Por el contrario, el pH cambia en los electrodos, alcanzando un pH más alcalino en el cátodo y un pH más ácido en el ánodo. Otra acción indirecta es la producción de productos tóxicos de la electrólisis, tales como H₂O₂ (Czerwińska-Główka et al., 2020).

Las CCM se distinguen de otros sistemas de generación de energía porque operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a muy bajas temperaturas; producen menor cantidad de CO₂ que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar energía, por lo que las pocas emisiones de este gas no requieren ningún tipo de tratamiento; no necesitan aporte de energía siempre

que el cátodo abiótico sea aireado pasivamente o sea un biocátodo; en el futuro podrían ser utilizadas en lugares remotos donde haya demanda de consumos básicos de energía eléctrica (Revelo et al., 2013).

El voltaje cosechado de las CCM se puede aumentar mediante uno de los siguientes dos enfoques, es decir, mediante el uso de una configuración a gran escala o conectando múltiples unidades pequeñas. Por ejemplo, se ha demostrado que el rendimiento anódico depende de la concentración del sustrato, mientras que el rendimiento catódico se rige significativamente por la conductividad de la solución. Además, los estudios realizados con reactores CCM a gran escala han demostrado que la generación de energía depende significativamente del área de la superficie del electrodo (Smita S. et al., 2019).

La trasferencia de electrones que ocurre dentro del sistema de la CCM se basa en tres vías, la primera es la transferencia directa de electrones a través de citocromos de la membrana externa microbiana, la segunda vía es por medio del uso de microorganismos exoelectrógenos, son microorganismos que se caracterizan por tener una Transferencia de Electrones Extracelulares (EET), es decir, capaces de donar o aceptar electrones, simplificando los mecanismos de transferencia de iones en el electrolito, este tipo de transferencia comúnmente se lleva a cabo por medio de una biopelícula cultivada, y la tercera vía es a través de apéndices de proteínas conductoras sólidas producidas por bacterias y con forma de nanocables o pili (Yasri N. et al., 2019) tal como se muestra en la ilustración 2 y 3.



Ilustración 2: Mecanismos con transportadores para la transferencia de electrones de microorganismos. Modificado de Kumar et al., 2015.

Durante la reacción electroquímica se generan biocidas, que causan cambios desfavorables en la composición de los microorganismos que conducen a su muerte. La mortalidad bacteriana también puede explicarse por galvanotaxia, que es el movimiento de partículas a un cátodo o ánodo bajo la influencia de un campo eléctrico. Las razones propuestas son probables, pero el mecanismo principal de acción del campo eléctrico sobre las bacterias aún no se comprende completamente y requiere investigación adicional en esta dirección (Czerwińska-Główka et al., 2020).

2.1.1. Biopelícula

Las colonias microbianas conocidas como biopelículas son aquellas que contienen un grupo diferente o ideal de microorganismos, se han utilizado ampliamente en las CCM (Yasri N. et al., 2019) como biocatalizadores. La corriente eléctrica se entiende comúnmente como el movimiento ordenado de electrones. Sin embargo, cuando se refiere a organismos vivos, los portadores de carga más comunes parecen ser iones, como K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, que dan lugar a las corrientes bioeléctricas. Dado que las membranas celulares son semipermeables, exigen selectividad para un tipo de iones, lo que resulta en la regulación de las concentraciones de iones extracelulares e intracelulares. Estas pequeñas partículas cargadas pueden viajar a través de la membrana mediante la difusión a través de los canales iónicos mediante el mecanismo de bomba de iones, en el cual es necesario proporcionar energía para el transporte de iones (Czerwińska-Główka et al., 2020).



Ilustración 3: Mecanismo de corto alcance, transferencia de electrones mediada y transferencias de electrones de largo alcance en una bacteria. Modificado de Joseph M. et al., 2018.

Los cambios potenciales locales generados por los iones en movimiento permiten dirigir el metabolismo, los impulsos eléctricos o la permeabilidad de la membrana celular dependiendo de la señal externa. Las señales eléctricas también se pueden usar para permitir que tanto las células vegetales o animales como las bacterias en las biopelículas se comuniquen entre sí, con la complejidad de los mensajes que varían desde señales simples hasta señales eléctricas complejas de larga distancia, que es más rápido que cualquier señalización química (Czerwińska-Główka et al., 2020)

Las bacterias son microorganismos que se caracterizan por tener varias dimensiones y formas. Las células bacterianas están incrustadas en sustancias poliméricas extracelulares (EPS por sus siglas en inglés), formando grupos bacterianos encogidos mejor conocidos como biopelículas, que parecen ser la forma preferida de comunidades bacterianas. En tales condiciones, las bacterias pueden compartir sus funciones e intercambiar información. Para coordinar su comportamiento, las bacterias usan señalización química y eléctrica. Las bacterias producen, secretan y pueden detectar ciertas moléculas, gracias a las cuales pueden reconocer el entorno, la presencia de otras bacterias y varias especies. Otra forma de comunicación es posible transmitiendo impulsos eléctricos. Es la señalización a larga distancia por canales de iones de potasio en la que tiene lugar la propagación de ondas de potasio ordenadas espacialmente. (Czerwińska-Główka et al., 2020).

Las biopelículas monocapa o multicapa de estos microbios facilitan la transferencia de electrones directamente a través de los citocromos de la membrana externa y / o apéndices conductores como los nanocables / pili. Alternativamente, algunos exoelectrógenos secretan compuestos electroactivos que actúan como mediadores para el desplazamiento indirecto de electrones al electrodo. Además, algunos mediadores añadidos exógenamente al analito también pueden facilitar la transferencia de electrones desde microbios fermentativos y otros microbios no electrogénicos (Yasri N. et al., 2019).

La actividad eléctrica depende estrictamente de la capacidad de las bacterias para formar la biopelícula, y no necesariamente solo de la densidad de la población bacteriana. En consecuencia, una sola bacteria puede recibir una señal eléctrica, pero solo en un grupo más grande las bacterias pueden cooperar. La actividad eléctrica no depende de la densidad de bacterias, sino de la posibilidad de crear una biopelícula (Czerwińska-Główka et al., 2020). Pero la producción de electricidad depende principalmente de los sustratos utilizados para el cultivo y el metabolismo de los microbios (Yasri N. et al., 2019). El desarrollo de la biopelícula comienza con el asentamiento de bacterias en la superficie del material, que ocurre a través de la acción de las fuerzas de Van der Waals, las interacciones ácido-base y las fuerzas electrostáticas. En general, las bacterias se adhieren a la superficie, comienzan a producir sustancias poliméricas extracelulares y comienzan a multiplicarse (Czerwińska-Główka et al., 2020).

2.1.2. Sustrato

Se explotaron los sustratos orgánicos como el azúcar de bajo peso molecular en un material orgánico complejo que contiene carbohidratos, proteínas, ácidos volátiles y aguas residuales para generar electricidad en los MFC (Kamaraj S. et al., 2019).

El potencial de las CCM tiene la capacidad de dirigir la conversión de energía eléctrica de los materiales orgánicos, donde el biocatalizador juega un papel vital (Kamaraj S. et al., 2019). Las sustancias orgánicas de las cuales se pueden alimentar a las CCM varían desde sustancias puras (acetato, glucosa, lactato, etc.) hasta sustancias químicas (alcoholes, celulosa, ácidos grasos, proteínas y azúcar), así como diferentes tipos de aguas residuales generadas a partir de residuos domésticos, actividades industriales y agroindustriales. Teóricamente, cualquier efluente rico en contenido orgánico puede ser alimentado a la celda de combustible microbiana para generar energía. Dependiendo del origen, los efluentes contienen diversas formas de contaminantes como materia orgánica biodegradable, nitrógeno, fósforo, sólidos en suspensión, jabones y detergentes, agroquímicos como fertilizantes, pesticidas, metales pesados y otros compuestos inorgánicos en cantidades variables. Estos constituyentes actúan como alimentos para que los microbios generen energía. Un efluente rico en contenido orgánico fácilmente

biodegradable y Demanda Química de Oxígeno (DQO), como aguas residuales de destilería y cervecería, se ha alimentado a la CCM como materia prima y se eliminó ~94% de su DQO inicial. Los consorcios microbianos de diversas cepas bacterianas pertenecientes a diferentes familias generan electricidad en ensamblajes de CCM mientras tratan aguas residuales y alimentos cargados orgánicamente (Yasri N. et al., 2019).

Los microorganismos activos se catabolizan activamente a fuentes de carbono, generando así bioelectricidad (Rahimnejad M. et al., 2014). La orina hace que las aguas residuales municipales sean ricas en fosfato y nitrógeno y es el mayor problema con las corrientes de aguas residuales convencionales. La eliminación de los componentes de orina hace que el reciclaje y el tratamiento de todos los demás desechos sean relativamente fáciles sin problemas posteriores de eutrofización (Yasri N. et al., 2019).

El metabolismo microbiano de electrones que no están asociados con un elemento químico, es decir, electrones 'libres', es una capacidad metabólica intrigante que se ha investigado principalmente en microorganismos reductores de metales insolubles, como las especies Shewanella o Geobacter (Deutzmann J. et al., 2016).

Además de estos procesos microbianos anódicos, estudios recientes han revelado que algunos microorganismos pueden absorber electrones catódicos 'libres' de minerales conductores durante la transferencia de electrones entre especies (Deutzmann J. et al., 2016). La parte básica de la tecnología de la CCM es el biocatalizador activo. Las cepas bacterianas electrogénicas pueden transferir los electrones producidos a través de metabolismo por medio de la membrana celular a un electrodo externo directamente sin agregar ningún componente artificial (Rahimnejad M. et al., 2014).

El rendimiento de las CCM se puede mejorar mediante la adición de mediadores de electrones artificiales. Los mediadores electrónicos se utilizan para transportar electrones desde el caldo hasta la superficie del electrodo anódico. Los mediadores son compuestos artificiales o producidos por el propio microorganismo. Algunos activos Los microorganismos producen nanocables para transferir los electrones

producidos directamente sin usar ningún mediador, pero otros organismos necesitan agregar electrones artificiales lanzaderas a la cámara del ánodo (Rahimnejad M. et al., 2014).

2.1.3. Membrana

La función de las membranas es uno de los factores más notables que influyen en la generación de energía de las CCM, separa físicamente las cámaras anódica y catódica, permitiendo la transferencia de protones al cátodo y evitando la permeabilidad del oxígeno al ánodo (Kamaraj S. et al., 2019).

Existen una gran variedad de distintas membranas que pueden ser utilizadas en una CCM, como las Membranas de Intercambio Protónico mejor conocidas como PEM (por sus siglas en inglés). Como se muestra en la Ilustración 4, el funcionamiento de una CCM con el uso de una PEM, también se suelen usar Membranas de Intercambio Iónico (IEM, por sus siglas en inglés), Membranas de Intercambio Catiónico (CEM, por sus siglas en inglés), y Membranas de Intercambio Aniónico (AEM, por sus siglas en inglés). Comúnmente se utiliza una membrana selectiva de protones como NAFION®, Ultrex, membranas bipolares, membrana dializada, poliestireno y, lana de vidrio, nano-porosa filtros y membranas de micro filtración (Kamaraj S. et al., 2019).



Ilustración 4: Representación esquemática de la reducción simultánea de desechos y la generación de electricidad en una celda de combustible microbiana, empleando organismos fotosintéticos en el ánodo. Modificado de Joseph M. et al., 2018.

En las CCM la PEM es un factor clave que afecta la generación de electricidad. El cátodo de la CCM funciona en condiciones aeróbicas mientras que el ánodo trabaja en condiciones anaeróbicas. Esto significa que el oxígeno que existe en esta cámara puede difundirse desde el cátodo a la cámara del ánodo a través de PEM lo que reduce el rendimiento de la CCM. Estos dos parámetros afectan la potencia generada por las CCM y debe tenerse en cuenta. Si el oxígeno se difunde a través de PEM y hace que el ánodo sea aeróbico, la CCM no puede producir energía y solo puede aplicarse para la eliminación de DQO y aguas residuales. En general, hay dos tipos de PEM; las membranas de intercambio de protones porosas y membranas no porosas, mejor conocidas como membranas densas. En las celdas de combustible, el deber principal de las membranas densas es separar el ánodo y el cátodo y evitar migración del electrolito anódico al compartimento catódico, así como evitando que el aire se mueva del compartimento cátodo al compartimento anódico. (Rahimnejad M. et al., 2014).

Lo que ha llamado la atención recientemente de los investigadores en el área, son las membranas de cerámica y arcilla porosas, se han utilizado ampliamente en experimentos con microbios. Las CCM con este tipo de membranas han demostrado tener estabilidad química, térmica y mecánica, a un bajo costo, entre muchas otras ventajas, por lo que las membranas cerámicas se convierten en un sustituto apropiado para las costosas membranas de intercambio iónico polimérico. Además, se han reportado buenos rendimientos de potencia en períodos a corto y largo plazo utilizando membranas cerámicas (Yousef V. et al., 2017). Las CCM con membrana de cerámica pueden ser una alternativa rentable y sostenible para la producción de energía, si se pudiera utilizar un sustrato orgánico complejo como donante de electrones. Muchos estudios en la literatura enfocan la producción óptima de energía de los materiales cerámicos al variar la composición de la cerámica, el espesor y la porosidad (Kamaraj S. et al., 2019).

Para mejorar significantemente el rendimiento de una CCM es esencial contar con el diseño de un reactor escalable, con el menor espacio posible entre los electrodos, especialmente se utiliza como materia prima aguas residuales domésticas reales con baja conductividad. Existen una gran variedad de configuraciones ya estudiadas para la construcción de una CCM con membrana PEM a base de cerámica, incluida la placa cilíndrica o plana, de una sola cámara. La primera vez que se utilizó una membrana cerámica plana, o también llamada de loza, fue por Park y Zeikus en 2001, en una CCM con una cámara catódica de aire, su membrana de loza que estaba hecha 100% Caolinita produce la cantidad de electricidad casi equivalente a utilizar una CCM de doble cámara, con una membrana PEM polimérica convencional. Singh y Dwivedi, 2016 compararon el desempeño de dos configuraciones de cámaras de CCM de cerámica, para placa plana y diseños cilíndricos. El mayor rendimiento de potencia de una CCM con membrana cerámica se obtuvo con un cátodo acuoso, en solución de peróxido de hidrógeno en la cámara catódica. Sin embargo, fue demostrado que el diseño del cátodo de aire podría superar el rendimiento cátodo acuoso cuando no se agregaron aceptores de electrones adicionales al cátodo acuoso. Chatterjee y Ghangrekar compararon diferentes configuraciones de CCM, así como diferentes ensambles membranaelectrodo. La CCM con cátodo de aire, con recubrimiento de carbono en ambos lados de la membrana de arcilla superó a los otros diseños. Esta CCM con el cátodo de aire produjo una densidad de potencia 5.2 veces mayor (4.38 W / m^3) que la CCM de doble cámara con cátodo acuoso (Yousef V. et al., 2017).

2.1.4. Ánodo

En la CCM uno de sus componentes más importantes es el ánodo, en su estructura y en su funcionamiento. Proporciona soporte para la unión bacteriana en el metabolismo del sustrato y al mismo tiempo actúa como un sumidero de electrones (Hindatu Y. et al., 2017). Los donantes de electrones orgánicos complejos en la cámara anódica no solo influyen en la comunidad microbiana, también influyen en la producción de energía y la viabilidad económica (Kamaraj S. et al., 2019). El bajo rendimiento del electrodo anódico en la CCM sigue siendo un gran obstáculo para sus aplicaciones prácticas. Se espera que la modificación exitosa del electrodo anódico mejore la eficiencia de generación de electricidad en la CCM. Materiales como nanotubos de carbono, acero inoxidable, polímeros conductores, óxidos

metálicos y electrolitos se han empleado como modificadores de electrodos anódicos con diversos grados de éxito (Hindatu Y. et al., 2017).



Ilustración 5: Ánodo de Fieltro de grafito.

Un material anódico para la CCM ideal debe ser adecuado para la fijación microbiana y al mismo tiempo facilitar electrones, transferencia y flujo. Una mala fijación microbiana en el electrodo limita la efectividad de la transferencia de electrones entre los microorganismos y el ánodo, afectando así el rendimiento general de la CCM, generando con ello una baja potencia de salida y dificulta la adopción práctica de esta tecnología. Otros factores que contribuyen son, la alta resistencia interna (IR), atribuido a las pérdidas de carga y transferencia masiva y el alto costo de los materiales del electrodo; el desarrollo de un ánodo utilizando materiales rentables y que al mismo tiempo ayude a mejorar el desempeño microbiano. El desarrollo/fijación, el metabolismo del sustrato y la transferencia extracelular de electrones (EET) proporcionan una mejora significativa de los componentes para aumentar el rendimiento y la viabilidad de la CCM. Los electrodos de ánodo comúnmente utilizados en la CCM incluyen carbono papel, tela de carbón, tela de carbón activado, fieltro de carbono, fieltro de fibra de carbono activado, fieltro de grafito (Ilustración 5), carburo de tungsteno, lámina de grafito, entre otros. El ánodo debe ser químicamente inerte, con propiedades anticorrosión y degradación, mecánica adecuada, alta resistencia y tenacidad. Si bien todos estos atributos son altamente deseables, en realidad, es un compromiso difícil ya que los materiales disponibles varían en sus propiedades fisicoquímicas, así como en sus conductividades para la unión microbiana y la transferencia de electrones (Hindatu Y. et al., 2017). En los electrodos, el material utilizado es de suma importancia ya que pueden provocar variaciones en la resistencia a la polarización. En distintos trabajos, los materiales de los electrodos han sido estudiados, evaluando el desempeño de su impedancia de las CCM, comparando electrodos metálicos y de tela de carbono, teniendo una mucho mejor resistencia de polarización la tela de carbono, por lo tanto, es posible tener una mayor potencia al reducir la pérdida en la interfaz electrodo-solución (He y Mansfeld, 2009).

2.1.5. Cátodo

La reacción catódica se ha considerado como una limitación para el rendimiento de las CCM por este motivo se ha prestado mucha atención al cátodo. En la CCM con cátodo aireado se logra una mayor densidad de potencia debido a una menor resistencia interna. Otra ventaja es un mayor requerimiento de energía causado por aireación que da como resultado una carga energética negativa. Los materiales del cátodo aireado deben ser resistentes a la corrosión y poseer una estructura porosa para permitir la transferencia de oxígeno a la capa de catalizador. Los materiales a base de carbono se utilizaron principalmente como sustrato catódico. En este trabajo los materiales utilizados para preparar el cátodo con aire fueron tela de grafito. El metal es otro tipo de material evaluado para preparar el cátodo de respiración, los metales comúnmente evaluados incluyen malla de níquel, malla de acero inoxidable y malla de cobre. (Wang Z. et al., 2017).



Ilustración 6: Cátodo airado de malla de acero inoxidable con MnO_X.

El uso normalizado de las CCM está limitada debido a problemas de durabilidad y alto costo de los materiales, principalmente derivados del uso de platino como catalizador para reacción de reducción de oxígeno (ORR) que ocurre en el lado del cátodo.

El MnO_x es un catalizador viable para cátodos de CCM debido a precios competitivos y alto rendimiento en términos de generación de energía y estabilidad del ciclo de voltaje (Ilustración 6). El MnO_x, además de tener una reducción de costos, es un material natural de gran abundancia, es amigable con la naturaleza y el medio ambiente, cuenta con buenas propiedades electroquímicas. Los materiales de los electrodos basados en dióxido de manganeso (MnO₂) han sido probados de manera exitosa en el cátodo de las CCM.

Se descubrió que la mejora en el rendimiento en la actividad ORR y el rendimiento electroquímico en general depende en gran medida del tamaño, la morfología, la estructura cristalina, la química de la superficie y área de superficie del cátodo (Logan, 2007).

Generalmente, el MnO₂ existe en tres formas cristalográficas, es decir, α -, β - y γ -, que corresponden a diferentes conectados [MnO₆] marcos octaédricos, lo que resulta en diferentes morfologías y estructuras de poros. Sin embargo, MnO₂ tiene una baja conductividad eléctrica intrínseca y sufre problemas de aglomeración y disolución, lo que limita su actividad como catalizadores de ORR.

El apoyo a MnO₂ en materiales altamente conductores, como el grafeno y el óxido de grafeno, el negro de carbón, los nanotubos de carbono y los carbonos activados es una estrategia ampliamente reconocida para superar los inconvenientes mencionados.

La conductividad electrónica, actividad catalítica y anclaje de las partículas metálicas pueden mejorarse aún más mediante la funcionalización de heteroátomos del soporte de carbono. En particular, los materiales de carbono, muestran una actividad mejorada de ORR con dopaje de nitrógeno en neutral y alcalino ambiente,

debido a la adsorción mejorada de oxígeno y descomposición de peróxido intermedio (Shahbazi F. et al., 2018).

2.1.6. Ventana óptica

La ventana óptica es utilizada en el dispositivo, para permitir la entrada de los rayos UV, al interior de la celda, y el fotoánodo sea estimulado por la luz UV (Ilustración 7), pero comúnmente se utilizan contenedores de cuarzo, una gran desventaja es que tienen un precio elevado, en consecuencia, se utilizan modelos pequeños y de grosor delgado que ocasionan que estos recipientes sean frágiles para su manipulación. Para contrarrestar este defecto, una alternativa propuesta es tener un depósito con una abertura por donde se pueda unir una ventana de iluminación plana de cuarzo.

Utilizando vidrio como material para el recipiente, el diseño se vuelve más sencillo con una forma cilíndrica horizontal, las entradas para los electrodos en la parte superior, en donde ambos extremos, o solo uno se encuentra abierto para colocar la o las ventanas de cuarzo para el paso de luz. El lado con la abertura se puede fundir en los bordes para unirlo con la pieza de cuarzo y sellar el recipiente para evitar que se filtre el electrolito o la solución que se emplee (Murphy et al., 2006), otra alternativa sería roscar la abertura de manera que la pieza de cuarzo pudiese atornillase, utilizando un empaque u O-ring para sellar el recipiente y evitar fugas; se conoce que fundir vidrio con cuarzo no es un proceso tan sencillo.



Ilustración 7: Ventana de plexiglass.

El contenedor puede fabricarse con otro material inerte y más robusto que el vidrio como el perspex, teflón u otro material plástico. Esto facilitaría el moldeado y fabricación de las piezas con formas cilíndricas o rectangulares. La unión de la ventana óptica se conseguiría realizando una abertura del lado en donde se colocaría la iluminación y para fijarla en su posición se utilizaría una placa de soporte para retener el cuarzo apoyándose de un empaque u O-ring o de una junta de silicona para generar el sello hermético con tuercas y pernos. En la parte superior del plexiglass o del material que se utilice para el recipiente se puede perforar para tener varias entradas correspondientes a los electrodos y algunos otros requerimientos que se deseen del sistema (Mishra, Shukla, & Srivastava, 2007). Los electrodos y otros aditamentos pueden sumergirse en la solución o introducirse a través de estas entradas. Se lograría sellar por completo el sistema y tener salidas específicas para la recolección de los gases generados en la reacción.

2.1.7. Degradación de sustratos por medio del fotoánodo

Los sistemas biológicos utilizan el tratamiento de aguas residuales, lo que permite la eliminación de contaminantes ambientales a través de la degradación microbiana (Czerwińska-Główka et al., 2020). Las celdas de combustible microbianas eliminan la DQO y la Demanda Biológica de Oxigeno (DBO) hasta en un 90% y liberan entre un 50 y un 90% menos de residuos de lodos en comparación con otros bioprocesos, lo que resulta en una reducción de costos final para la eliminación de lodos (Yasri N. et al., 2019).

Existe una gran variedad de celdas de combustible, entre ellas la CCF, en comparación con las CCM convencionales, posee características deseables: 1) La CCF puede utilizar la luz solar como fuente de energía, lo que permite la producción y el transporte rápidos y directos de electrones fotogenerados, y puede degradar los contaminantes con alta eficiencia de degradación; 2) CCF puede usar compuestos orgánicos refractarios o tóxicos como sustrato que no pueden ser digeridos de manera efectiva por microbios o incluso inhibiría su crecimiento; 3) un sistema PFC se puede construir y operar fácilmente en condiciones de reacción moderadas y se puede encender y apagar fácilmente controlando la entrada de luz; 4) los recientes avances en nanotecnología permiten un diseño racional de materiales de electrodos

de alto rendimiento para CCF; y 5) la fuerte capacidad oxidativa de los huecos fotogenerados y radical hidroxilo (*OH) asegura la oxidación no selectiva de sustratos en un CCF típico (M. Li et al., 2019), uniendo estas cinco características a una CCM convencional se puede llegar a desarrollar un prototipo innovador, que pueda generar energía eléctrica y tratamiento del agua por medios microbianos, pero simultáneamente generar electrones fotogenerados y oxidación del agua residual por medio de los *OH generados.



Ilustración 8: Fotoánodo de TiO₂ con Etil Celulosa al 2%, sobre vidrio conductor de FTO.

El fotoánodo se activa por irradiación de luz. y el proceso de excitación de los electrones se produce por valencia banda (VB) a banda de conducción (CB) cuando la energía del fotón es mayor que la energía de la brecha de banda (Ilustración 8). Los huecos generados en VB pueden degradar directamente las moléculas orgánicas adsorbidas o producir el 'OH al reaccionar con moléculas de agua. Los procesos de oxidación avanzados (AOP) que implican la generación de 'OH como un agente oxidante muy poderoso con un potencial redox de 2.80 eV. El 'OH es oxidación no selectiva y puede destruir la mayor parte de lo orgánico contaminante hasta la mineralización total. Las moléculas orgánicas son atacadas por 'OH puede tener la posibilidad de participar en la deshidrogenación, hidroxilación y reacciones redox (Nordin et al., 2020).

En la cámara del ánodo, el contaminante orgánico es degradado por huecos fotoinducidos generados por el fotoánodo bajo radiación solar y algunos radicales libres oxidativos fuertes ('OH principalmente) por la reacción de H₂O y huecos fotoinducidos. La separación de los electrones y huecos fotoinducidos se mejora a través de un voltaje de polarización generado por la celda, que promueve la

transferencia de electrones fotoinducidos a través de un circuito externo al cátodo. Por lo tanto, se mejora la degradación de contaminantes. Los electrones fotoinducidos pueden ser capturados en la cámara del cátodo por O₂ para generar H₂O₂. En consecuencia, el sistema puede realizar simultáneamente producción de electricidad, y degradar aguas residuales y producir H₂O₂ (Tian et al., 2020).

Los AOP han atraído un interés considerable porque son más efectivos y sostenibles a largo plazo. Son tecnologías que generalmente usan un agente oxidante fuerte (O₃, H₂O₂) y / o catalizador (Fe, TiO₂) en presencia o ausencia de una fuente de irradiación, generando 'OH altamente reactivos. Esos radicales pueden mineralizar sustancias orgánicas refractarias que están presentes en los efluentes industriales (Bergamini et al., 2009).

Para la degradación de sustratos orgánicos, los huecos fotogenerados con una fuerte capacidad de oxidación son esenciales, ya que estos reaccionan directamente con los sustratos o se convierten en 'OH antes de degradar los sustratos orgánicos. Durante la reacción, las moléculas de sustrato cerca del ánodo se consumen continuamente, formando un gradiente de concentración entre la superficie del ánodo y la solución a granel. Esto favorece que las moléculas del sustrato se difundan hacia la superficie del fotoánodo y, como tal, mejora el rendimiento (M. Li et al., 2019).

Para conocer la eficiencia de degradación se utiliza la fórmula:

$$\eta = (c_0 - c_t) c_0$$

Donde:

 c_0 = La concentración inicial del contaminante orgánico

ct = La concentración instantánea de contaminante orgánico cuando se muestrea (Jing Baia et al., 2016).

2.1.8. Dip-coating

El método de recubrimiento por inmersión (dip-coating) es una técnica sencilla y una de las más antiguas para recubrir. Este método usualmente se utiliza para depositar sobre metales como láminas de acero (Ahmad S et al., 2017). Entre las diferentes técnicas de deposición de película fina, El recubrimiento por inmersión sol-gel es el más simple, económico y tiene ventajas como que el TiO₂ se ancla fácilmente en los sustratos teniendo las formas complicadas y los sustratos de gran superficie (Santoro C et al., 2016).

Para implementar esta técnica, se prepara una solución homogénea del material semiconductor con un solvente volátil. Se utiliza un sustrato limpio, el cual es sumergido a velocidad constante en la solución y se mantiene inmerso durante un tiempo predefinido. Después se extrae el sustrato del líquido y se deja reposar para que el disolvente se evapore. El resultado es, una capa suave y fina del soluto sobre el sustrato. Existen dos tipos de recubrimiento por inmersión: (1) Recubrimiento por inmersión en lote, y (2) recubrimiento por inmersión continuo (Ilustración 9). Ambas técnicas de recubrimiento por inmersión constan de: Inmersión, arranque, deposición, drenaje y evaporación. La diferencia entre las dos variantes es que el recubrimiento por inmersión continuo solo se emplea para sustratos flexibles como láminas de plástico conductor y láminas de metal conductoras como: Acero, cobre etc. En este método es muy importante el control de espesor de la película. Para obtener capas finas se utiliza una velocidad de inmersión muy lenta, y para revestimientos más gruesos, se emplean velocidades de inmersión rápidas con solventes de evaporación rápida (Ahmad S et al., 2017).


Ilustración 9: Procesos de inmersión, deposición y drenaje de la técnica de dip-coating, b) variación continúa de la técnica de dip-coating modificado de Ahmad, Pandey, & Rahim, 2017.

2.1.9. Método Sol-Gel

La técnica de síntesis de Sol-Gel es un proceso efectivo para la producción de nanomateriales en varias formas, incluyendo partículas de tamaño nanométrico. Las propiedades del producto final dependerán de los parámetros de síntesis y de la selección de los precursores químicos. La estabilidad del sol dependerá de los tensioactivos (Baraton, 2003).

2.1.10. Procesos fotolíticos

Informes en la literatura indican la posibilidad de inmovilizar partículas de Titania en vidrio. El desprendimiento de Titania del soporte puede representar un problema cuando los líquidos circulan a altas velocidades. Para mitigar este problema, otros autores han usado la técnica de sol-gel para depositar membranas semiconductoras en soportes Pyrex y sinterizar el compuesto en el material. El catalizador soportado resultante se puede usar para efectuar la fotodegradación de varios compuestos orgánicos (Aguado et al., 1994).

También conocido como fotocatalítico para la degradación de contaminantes disueltos en agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación, que es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar estados excitados el tiempo necesario para experimentar reacciones. La energía radiante es absorbida por las moléculas en forma de unidades cuantizadas fotones, los cuales han de contener la energía requerida para excitar electrones específicos

y formar radicales libres, dando lugar a una serie de reacciones en cadena (Gálvez, 2002).

Estos radicales libres pueden generarse por transferencia electrónica desde el estado excitado de la molécula orgánica hacia el oxígeno molecular, originándose el radical superóxido (O₂·), o hacia otros reactivos químicos como el ozono o el peróxido de hidrógeno, en cuyo caso se producen 'OH. Los métodos basados en la acción de la luz utilizada normalmente radiación ultravioleta (UV) debido a la mayor energía de sus fotones (Gálvez, 2002).

En la Ilustración 10 se muestra el principio de funcionamiento de la Celda de Combustible Solar Microbiana, en la cual interactúan varias reacciones químicas, como ya se mencionó anteriormente en la cámara anódica se lleva a cabo un proceso de oxidación de la materia orgánica que se encuentra en el sustrato, por medio de los microrganismos que habitan en él, liberando pequeñas cantidades de CO₂, de protones que por medio de la membrana de intercambio protónico viaja hacia la cámara catódica, y de electrones que viajan hasta el cátodo por medio de la diferencia de potencial eléctrico, generando así una corriente eléctrica. En la cámara catódica se lleva a cabo el proceso de reducción, donde se absorbe O₂, y se puede producir H₂O o hidrógeno. En la cámara anódica también tenemos el fotoánodo que cómo se explicó anteriormente este compuesto de un material semi conductor, en este caso TiO₂ con Etil-Celulosa, dónde los electrones se encuentran en la banda de valencia pero gracias a su excitación por la luz ultravioleta pueden cruzar la banda prohibida, llegando a la banda de conducción, gracias a este efecto electrón hueco, se genera un proceso de oxidación avanzada, en dónde se oxida la materia orgánica presente en el agua residual de la celda, este proceso favorece y complementa el proceso de la CCM, aumentando la eficiencia de generación de energía y del tratamiento de aguas (llustración 10).



Ilustración 10: Funcionamiento de la Celda de Combustible Solar Microbiana.

2.1.11. Radicales Hidroxilo('OH)

Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos principalmente por atracción de hidrógeno o por adición electrolítica a dobles enlaces generándose radicales orgánicos libres (R[•]) que reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno formando un peroxiradical, iniciándose una serie de reacciones de degradación oxidativa que pueden conducir a la completa mineralización del contaminante (Gálvez, 2002).

 $RH + OH \rightarrow RH + H_2O$

Los radicales hidroxilos tienen una elevada reactividad, sin embargo, su efectividad degradativa no siempre es elevada y pueden producir reacciones lentas con determinadas moléculas como ocurre con los compuestos clorados de cadena corta. Los procesos de oxidación avanzada son técnicas para el tratamiento de contaminantes persistentes en agua ya que muchos de estos compuestos se caracterizan por una alta estabilidad y/o gran dificultad para ser mineralizados totalmente (Gálvez, 2002).

Las características más positivas de los procesos de oxidación avanzada son los siguientes:

Capacidad para llevar a cabo una total mineralización de los contaminantes orgánicos hasta dióxido de carbono e iones como cloruro, nitrato, sulfato, etc (Gálvez, 2002).

Reactividad no selectiva ante la mayoría de los compuestos orgánicos, hecho especialmente interesante si se quiere evitar la presencia de productos de degradación tóxicos, que si pueden originarse mediante otros métodos que no consiguen la oxidación completa. Además, esta característica permite tratar aguas con diferentes contaminantes, siendo posibles tratar todos simultáneamente. Únicamente aguas residuales con contenido inferior a 5 gL⁻¹ de DQO pueden ser susceptibles de ser tratadas mediante los procesos de oxidación avanzada, debido fundamentalmente al elevado coste de reactivos y/o energía, así como a razones de índole cinético (adsorción en catalizador, absorción de luz, consumo de oxígeno durante la oxidación). Las aguas con contenidos mayores deben ser tratadas mediante otras técnicas como la oxidación húmeda y/o la incineración (Gálvez, 2002).

La descontaminación fotocatalítica solar en la actualidad es una de las más exitosas aplicaciones de la fotoquímica solar. La fotocatálisis solar es una excepcional demostración de la aplicación de la energía solar en la conservación medioambiental. Se define fotocatálisis solar como la aceleración de una foto reacción química en la cual se produce una alteración fotoquímica de alguna especie química como resultado de la absorción de radiación por otra especie fotosensible, en este caso catalizador (Gálvez, 2002).

Hay dos tipos de procesos de fotocatálisis, la fotocatálisis heterogénea y la homogénea. La fotocatálisis heterogénea es el uso de un sólido semiconductor (ejemplo: TiO₂, ZnO, etc.) que forma una suspensión coloidal estable irradiación para estimular una reacción en la interfase sólido/liquido o sólido/gas. En el caso de la fotocatálisis homogénea el catalizador está disuelto en el agua que convierte los contaminantes a tratar, también disueltos, por lo que todos los elementos que intervienen en el proceso se encuentran en la misma fase. El TiO₂ tiene la ventaja adicional de poder utilizar radiación UV sola, debido a que la separación energética entre las bandas de valencia y de conducción, es tal que los fotones con longitud de onda inferior a 378 nm tienen energía suficiente para producir la excitación fotónica del catalizador (Gálvez, 2002).

CAPÍTULO 3 MÉTODO O PROCEDIMIENTO

3.1. RESUMEN CAPÍTULO 3

Al iniciar el proyecto fueron planteados los objetivos generales y específicos, el planteamiento del problema y la hipótesis, para realizar dichos objetivos se diseñó un plan de trabajo en el cual se iniciaría con el diseño del prototipo, buscando que fuera un prototipo económico, a nivel laboratorio e ideal para realizar todas las pruebas pertinentes. De igual forma se realizó una exhaustiva búsqueda teórica para la elección de los materiales ideales como se muestra en la llustración 11.



Ilustración 11: Esquema ilustrativo de las partes esenciales y los materiales de la Celda de Combustible Solar Microbiana.

Se llegó a la conclusión de utilizar fieltro de grafito como ánodo debido sus excelentes características en la transferencia de electrones, su practicidad y desempeño ya conocidas para el ánodo. Para el cátodo se realizó una tinta conductiva de desechos de baterías usadas, es bien sabido, este desecho es altamente contaminante, cuando no es desechado de la manera correcta, pudiendo contaminar cuerpos de agua, y suelos, por su alta concentración de ácidos. Cuidadosamente se extrajo de las baterías MnO_x, para realizar la tinta conductiva,

en la literatura se tienen reportes que este material es favorable en el cátodo de las celdas por su alta capacidad de oxidación (Jadhav et al., 2017). Se creó la tinta con dos métodos diferentes, con la única variación en el solvente utilizado, colocando cada cátodo en diferentes celdas, teniendo como resultado dos celdas idénticas con distinto cátodo como se muestra en la llustración 27. Otra parte esencial de la celda es la membrana de intercambio protónico, se optó por utilizar una membrana de barro, como ya se mencionó anteriormente, las membranas de cerámica y arcilla porosas han demostrado tener estabilidad química, térmica y mecánica, a un bajo costo (Ilustración 12). El fotoánodo se decidió que fuera de TiO₂ con Etil-Celulosa sobre vidrio conductor FTO (Ilustración 8). Para fabricar el cuerpo de la celda se optó por un cubo de acrílico, por su fácil manejo y construcción, y por ser un material económico y resistente. En el exterior del cubo de acrílico, en la parte frontal de la cámara anódica, se encuentra una pequeña ventana de cuarzo para permitir que la luz UV interaccione directamente con el fotoánodo. También en la parte exterior de la celda se encuentran las terminales de los electrodos, estos son pequeños alambres de acero inoxidable. Las terminales del fotoánodo fueron cubiertas con un cilindro de vidrio rellenados con acrílico, para mejorar su estabilidad y aislarlos con el medio de la cámara anódica.

Una vez que se establecieron los materiales de la celda, se realizó un diseño en SolidWorks, este se muestra en la Ilustración 12; esto con el objetivo de tener una proyección de cómo se vería la celda, y conocer sus áreas de oportunidad, por ejemplo, que la materia orgánica se asentara en la cámara anódica, se solucionaría con un agitador magnético.



Ilustración 12: Diseño en SolidWorks de Celda de Combustible Solar Microbiana.

3.2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Se realizó la construcción del prototipo, las partes acrílicas fueron cortadas con una cortadora láser, utilizando el diseño en SolidWorks, cada una de sus partes fueron unidas con cloroformo.

3.2.1. Construcción de la Membrana de Intercambio Protónico

Para la construcción de las membranas de intercambio protónico, el barro fresco fue moldeado hasta obtener placas cuadradas, se dejaron secar a temperatura ambiente durante una semana, posteriormente se colocaron en la estufa de laboratorio con una rampa de temperatura de 100°C, al llegar a esa temperatura se dejó durante 15 min para esperar a que se estabilizara la temperatura y se aumentó la temperatura a 200°C, al llegar a esa temperatura se dejaron deshidratar durante 2 horas, terminado ese tratamiento se dejaron enfriar durante 8 horas. Posteriormente se colocaron en la mufla por un periodo de 5 horas a una temperatura de 800°C, de igual forma con rampas de temperatura de 100°C, y se dejaron enfriar por 8 horas. Las placas de barro ya horneado, fueron lijadas hasta llegar al tamaño y grosor deseado, siendo las dimensiones de 8.9 cm por cada lado de las placas, con un grosor aproximado de 6 mm. Las membranas ya horneadas y lijadas fueron sumergidas durante 6 horas en agua desionizada, por último, fueron colocadas 3 capas de esmalte transparente en aerosol a cada una de las placas de barro como se muestra en la llustración 13.



Ilustración 13: Membranas de Intercambio Protónico de barro.

La membrana de intercambio protónico se colocó a la mitad de la CCSM, el espesor de la membrana es de 6 mm, y la distancia interna de cada una de las caras de la celda es de 89.4 mm, tal cual se observa en la ilustración 14.



Ilustración 14: Imagen ilustrativa de colocación de la membrana en el sistema.

3.2.2. Construcción del Ánodo

Con la finalidad de construir el ánodo fue recortada Tela grafitada de marca Mersen en forma cuadrada, teniendo 8.5 cm por lado, sostenida por un alambre de acero inoxidable. El alambre de acero inoxidable se extendió para que sirviera de colección de electrones, por lo cual fue reforzado con un cilindro de vidrio rellenado con resina de dos componentes con la finalidad de ofrecer una mayor rigidez.

3.2.3. Construcción del Cátodo

Para la construcción del cátodo fue recortada una malla de acero inoxidable de un tamaño menor al de la membrana de intercambio protónico, siendo el tamaño de la malla de 8.5 cm por lado. Al igual que con el ánodo se agregó un alambre de acero inoxidable como extensión del cátodo afuera del sistema de la celda.

3.2.3.1. Catalizador del Cátodo

En la preparación del cátodo de la celda se utilizó Dióxido de Manganeso y Carbono proveniente de baterías utilizadas como catalizador, en la tinta conductiva. Para llevar a cabo la extracción es necesario perforar la carcasa de acero de la batería, primeramente, retirando uno de los electrodos, a continuación, se puede observar el Dióxido de Manganeso y Carbono, se debe de retirar cuidando no perforar el separador para que no se mezcle con el ánodo de la pila, siendo un polvo de metal de zinc. Una vez extraído el Dióxido de Manganeso y Carbono de la pila el contenido

fue molido en un mortero de ágata, y colocado en un envase para su almacenamiento como se observa en la llustración 15.



Ilustración 15: Carbono con dióxido de manganeso triturado en mortero.

Preparación de Tinta Conductiva de MnOx

Reactivos

- Tolueno Sulfonamida
- Etil Celulosa
- Acetato de Butilo
- MnO_x

Equipo

- Balanza granataria digital
- Vaso de precipitado de cristal 10 mL
- Matraz esférico de fondo plano 50 mL
- Espátula de laboratorio
- Parrilla de agitación magnética
- Agitador magnético Barra
- Charola de pesaje
- Pipeta volumétrica o graduada de 10 mL
- Perilla de pipeta
- Embudo de laboratorio
- Pincel pequeño escolar

Procedimiento

• Solvente

Pesar, con ayuda de la charola de pesaje, espátula de laboratorio, y la báscula digital, 2 g de Tolueno Sulfonamida (Tetraethylammonium p-toluenesulfonate-97% proveedor, Sigma-Aldtich®) y 1 g de Etil Celulosa.

Con apoyo de la pipeta volumétrica o graduada de 10 mL y la perilla de pipeta, medir 10 mL de Acetato de Butilo, colocarlo en el matraz esférico de fondo plano de 50 mL.

Agregar poco a poco, con apoyo del embudo de laboratorio, los 2 g de Tolueno Sulfonamida y el gramo de Etil Celulosa al vaso de precipitado con el Acetato de Butilo.

Con apoyo del agitador magnético de barra y la parrilla de agitación, agitar la mezcla preparada durante 30 minutos.



Ilustración 16: A) Solvente de tinta en parrilla de agitación. B) Solvente al finalizar agitación.

• Tinta

Pesar 0.350 g de MnOx por cada cm² de área del cátodo, en este caso por 12.25 cm^2 , siendo el peso total de 4.2875 g.

Pesar 0.30 g del solvente preparado por cada cm² de área del cátodo, en este caso el peso total es de 3.675 g.



Ilustración 17: MnOx y Solvente pesados.

Mezclar ambos compuestos de manera homogénea ya pesados en un vaso de precipitado de cristal 10 mL, con ayuda de un pincel pequeño escolar crear una mezcla uniforme y colocar capas homogéneas, tratando de que quede una película homogénea.



Ilustración 18: A) Área de trabajo del cátodo donde se coloca la tinta. B) Cátodo con tinta ya colocada.

Como solvente en la tinta conductiva se probaron dos distintos materiales, el primero un esmalte transparente comercial ya reportado en anteriores trabajos de investigación (Kamaraj et al., 2017). El esmalte comercial se comparó con uno realizado en el laboratorio.

3.2.4. Preparación de Película de Dióxido de Titanio con Etil Celulosa

La construcción de los fotoánodos de Dióxido de Titanio y Etil Celulosa fueron preparados con varias concentraciones de Etil celulosa, durante la formación de sol gel. Inicialmente se realizaron Película de Dióxido de Titanio con Etil Celulosa a concentraciones de 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% y 2.5%, posteriormente fueron analizadas dichas películas, y dados los resultados obtenidos fue concluido, que la concentración adecuada de Etil-Celulosa para la construcción del Fotoánodo sería de 2.0%, por lo cual, fue repetido el siguiente procedimiento, pero en concentración de 2.0% de Etil-Celulosa.

Proceso de preparación del Sol-Gel de TiO₂

Para preparar 100 mL se requieren los siguientes reactivos:

- 20.73 mL de Isopropóxido de Titanio
- 3.00 mL de Ácido Clorhídrico
- 1.90 mL de Agua desionizada
- 74.37 mL de Alcohol Etílico

Y los siguientes materiales

• Matraz volumétrico 100 mL

En este caso el Alcohol Etílico es el medio, es decir es el solvente de la mezcla, el Isopropóxido de Titanio es el precursor de Titanio, y el Ácido Clorhídrico, es el catalizador de la hidrólisis que se lleva a cabo en la reacción química.

Procedimiento

- 1. Adicionar 74.37 mL de Alcohol Etílico en el matraz de bola.
- Preparar una solución con 3 mL de Ácido Clorhídrico: 1.90 mL de Agua Desionizada y 1.10 mL de Ácido Clorhídrico.
- 3. Vaciar la solución en el embudo de adición.
- 4. Agregar 20.73 mL de Isopropóxido de Titanio al matraz bola que contiene el alcohol del paso 1 en agitación (que no toque las paredes).

5. Iniciar el goteo de la mezcla 3 (primero la agitación lenta y luego al añadir las gotas aumentar un poco la velocidad) como se muestra en la llustración 19.



Ilustración 19: Goteo del Sol-Gel.

Agregar Etil Celulosa

Ya que esté listo el Sol-Gel de TiO₂ se le agrega Etil-Celulosa al 2.0%, tomando en base a la densidad del etil celulosa que es de 1.14 g/mL, se realiza una regla de tres para calcular el porcentaje que se debe de añadir al TiO₂

1.14 g/mL ----- 100%

X ------ 2.0%

Obteniendo como resultado 0.022 g/mL de Etil Celulosa, esto quiere decir que se va a agregar esa cantidad por mililitro de la solución Sol-Gel de TiO₂

Procedimiento

- 1. Multiplicar 0.022 g/mL, por los mililitros de Sol-Gel TiO₂.
- 2. Pesar la cantidad resultante.
- 3. Colocar el Sol-Gel TiO₂ en un matraz de bola con fondo plano.
- 4. Colocar el matraz a una plancha de agitación.
- 5. Agregar un agitador magnético al matraz.
- 6. Iniciar el agitado a una velocidad media.
- 7. Agregar poco a poco el Etil Celulosa del paso dos, sin dejar de agitar.
- 8. Seguir agitando por 2 horas, o hasta que se tenga una mezcla homogénea.

3.2.5. Corte de Vidrios Conductores

Los vidrios de óxido de estaño dopado con flúor (FTO, por sus siglas en inglés) son cortados por el lado no conductor.

Con apoyo de una regla se hace pasar el cortador sobre la superficie, se genera presión sobre el vidrio para terminar de realizar el corte, teniendo un área de 35 mm por 45 mm (Ilustración 20).



Ilustración 20: Medidas de vidrio conductor para fotoánodo.

3.2.5.1. Limpieza de los Vidrios Conductores

Los vidrios ya cortados son lavados con agua y jabón, posteriormente, se colocan en baño ultrasónico en Acetona durante 60 minutos, se colocan en la mufla a 140 °C por una hora.

3.2.6. Depósitos de Sol-Gel de TiO2

Los vidrios conductores son cubiertos con cinta adhesiva Kapton cubriendo la zona no conductiva del vidrio, así como del lado conductivo para delimitar el área de trabajo del fotoánodo, con la finalidad de dejar el área de trabajo de 35 mm, por 35 mm, para realizar los depósitos (Ilustración 21).



Ilustración 21: Vidrio conductor con área de trabajo delimitada por cinta Kapton.

Se realizaron 4 inmersiones en el equipo de Dip Coating, con un tiempo de 60 segundos de tiempo de permanencia y 180 segundos en la formación de la capa húmeda al retirar el sustrato y gelificación de la capa por evaporación del solvente. Después de cumplirse los 180 segundos las muestras se colocan 10 minutos en el horno eléctrico, a una temperatura de 120 °C (Ilustración 22).



Ilustración 22: Inmersiones de vidrios conductores en TiO₂ con Etil Celulosa, en dispositivo Dip coating.

Después de la última etapa de evaporación del solvente se extraen las cintas adhesivas a los vidrios y se limpia con Alcohol Isopropóxido los restos de Sol-Gel fuera de la zona de trabajo.

Los vidrios son colocados en la mufla calentada previamente a 120°C durante 10 minutos, después de ese tiempo se elevan 100°C la temperatura y se esperan otros 10 minutos al alcanzar la temperatura de 220°C. Esta rampa de calentamiento es sucesiva hasta obtener una temperatura de 450°C, alcanzada esta temperatura se mantienen 2 horas en la mufla. Posteriormente se apaga el equipo y se deja enfriar mínimo de 8 a 12 horas para que consiga la temperatura ambiente. Al finalizar todo el proceso quedan los vidrios conductores depositados con la película del sol gel (Ilustración 23).



Ilustración 23: Fotoánodos de TiO₂ con Etil Celulosa.

3.2.7. Colocación de cable conductor al circuito externo

A las películas de TiO₂ con Etil Celulosa se les colocó tinta conductiva de plata en el lado conductor del vidrio, en la parte superior del depósito de TiO₂, sin tocarlo, en forma cuadrada, como se ve en la ilustración 24.



Ilustración 24: Colocación de tinta conductiva de Plata.

Sobre la tinta conductiva de Plata se sitúa un caimán, procurando que el caimán este en contacto con la tinta de Plata, con la finalidad de que alambre sea un conductor eléctrico, entre el fotoánodo y el exterior de la celda, o para realizar pruebas electroquímicas al fotoánodo (Ilustración 25).



Ilustración 25: Fotoánodos con Caimán.

Sobre el área con la tinta conductiva y la pinza del caimán se colocó aislante liquido dieléctrico anticorrosivo, para evitar que el electrolito ya sea de la celda o del analito en las pruebas electroquímicas entren en contacto con el área de la tinta conductiva y el caimán, toda el área del caimán es recubierta con aislante líquido (Ilustración 26).



Ilustración 26: Colocación de aislante liquido dieléctrico anticorrosivo sobre Fotoánodos.

Una vez finalizada la construcción de cada parte de la celda, estas fueron unidas; en la cámara anódica fue colocado como electrodo tela grafitada de la marca Mensen, de la misma área que el cátodo. También fue colocado el fotoánodo de TiO₂, como electrolito se utiliza agua residual. Dentro de la misma cámara se introdujeron un par de torres de acrílico con la finalidad de disminuir el volumen de la cámara. En la cámara catódica se adhirió la maya de acero inoxidable con su respectiva tinta conductiva, en cada celda la cámara catódica se encuentra aireada. La celda cuenta con una tapa para que la cámara anódica sea anaerobia (Ilustración 27).



Ilustración 27: Prototipo de Celdas de Combustible Solar Microbiano.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS PELÍCULAS DE TIO₂ A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ETIL-CELULOSA

Se realizó un estudio fotoelectroquímico a las de películas de TiO₂ con diferentes concentraciones de Etil Celulosa, tales como:

- Voltamperometría de barrido lineal (VBL).
- Voltametría cíclica (VC).
- Cronoamperometría.
- Potencial de circuito abierto (PCA).

Estas pruebas se realizaron con y sin el estímulo de una lámpara de xenón, la cual tiene un espectro de emisión similar al espectro solar, de la marca Oriel. Fue utilizada una Celda Fotoelectroquímica con un arreglo que incorporaba un electrodo auxiliar de malla de acero recubierta de platino, un electrodo de referencia de Calomel saturado y cada uno de los fotoánodos a analizar fungían como electrodo de trabajo. La celda es llenada con solución de electrolito, hasta la parte superior de la ventana, donde incidirá la luz, este electrolito fue preparado de la siguiente manera:

• Con un matraz volumétrico se miden 500 mL de agua desionizada, los cuales se van a vertir en un vaso de precipitados de 1 L.

• En una balanza analítica se pesan 35.5 g de sulfato de sodio con ayuda de la charola para pesaje.

• Se mezclan los 35.5 g de sulfato de sodio con agua desionizada.

Ya que el sulfato de sodio está completamente disuelto en el agua, se retirarán
3.85 mL de la solución con ayuda de la pipeta.

• Con la pipeta se medien 3.85 mL de ácido clorhídrico. Los cuales después se mezclan con la solución de agua desionizada, y sulfato de sodio. El pH de la solución será de 1.

• Después en la tapa de la celda, en el lado izquierdo se coloca la malla recubierta de platino. En el centro el electrodo de Calomel, y en el lado derecho el fotoánodo.

• Se tapa la celda, procurando que el caimán que sostiene al fotoánodo no toque la solución.

En la celda se vierte el electrolito preparado anteriormente, hasta la parte superior de la ventana, donde incidirá la luz. En la tapa de la celda, en el lado izquierdo se coloca la malla recubierta de platino. En el centro el electrodo de Calomel, y en el lado derecho el fotoánodo. Fue tapada la celda, procurando que el caimán que sostiene al fotoánodo no toque la solución.

Para la conexión de la celda el electrodo azul, se conectan a la malla de platino, el electrodo blanco, al electrodo de Calomel, el rojo, a la conexión del fotoánodo y el negro, queda sin conexión tal cual se muestra en la llustración 28.



Ilustración 28: Análisis electroquímicos al fotoánodo.

En la Ilustración 29 se muestra gráficamente el proceso de fabricación y caracterización de los fotoánodos. Fue preparó inicialmente un Sol-Gel de TiO₂ con diferentes concentraciones de Etil-Celulosa, para ser depositados sobre vidrios conductores de FTO por el método de Dip Coating, llevados a un tratamiento térmico en la mufla, para ser analizados en un Espectroscopio UV-Vis y en un Potenciostato Galvanostato, con la estimulación de una fuente de Xenón.



Ilustración 29: Procedimiento de preparación y caracterización de Fotoánodos.

3.4. RECOLECCIÓN DE AGUA RESIDUAL

El agua residual fue colectada directamente de planta de tratamiento de la Universidad Politécnica de Aguascalientes, la cual capta el agua residual de todas las instalaciones de la Universidad; este efluente puede considerarse de uso doméstico, ya que es agua utilizada en baños y cafetería. La muestra fue tomada directamente como agua cruda sin ningún tratamiento previo ni posterior (Ilustración 30).



Ilustración 30: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Politécnica de Aguascalientes.

Cabe mencionar que también fue tomada y evaluada una muestra del agua del Rio San Pedro de la ciudad (Ilustración 31), pero al parecer dicha agua ya contaba con un tratamiento, por lo cual no fue el óptimo para las celdas, dando un bajo voltaje en las celdas microbianas.



Ilustración 31: Recolección de Agua Residual en el Rio San Pedro.

Dichas muestras de agua son almacenadas en el laboratorio a una temperatura de -4°C, caracterizadas y utilizadas en las celdas.

3.5. PRUEBAS DE CALIDAD DEL AGUA

Las pruebas de calidad de agua son un parámetro indispensable para las CCM, ya que indican la eficiencia del sistema en el tratamiento de aguas, dichas pruebas son realizadas antes de verterlas a la Celda, esto con el fin de conocer las características fisicoquímicas iniciales del agua residual recolectada. Se realizan cuando el voltaje de la celda disminuye drásticamente, una reducción en el voltaje de la Celda es totalmente normal después de cierto tiempo, esto indica que las bacterias ya han terminado su proceso biológico, en este punto también es cuando finaliza el tratamiento del agua por parte de los microorganismos, por eso también se realiza la prueba de calidad de agua en este momento, para realizar un comparativo de antes y después del proceso. En el caso de la Celda de Combustible Solar Microbiana se va a realizar de igual forma al inicio y al final de proceso. La medición del pH, es el único parámetro que se mide antes, durante y después del proceso, ya que el nivel de acides o alcalinidad del agua es un factor crucial para el buen

desarrollo de los microorganismos, cuando se encuentran en un ambiente ácido les perjudica, y al ser un agua residual es extremadamente extraño tener un agua alcalina, entonces debe de ser un agua básica o ligeramente ácida. Otro estudio que se realiza es el análisis de Carbón Orgánico Total (COT), este determina la cantidad de carbón orgánico e inorgánico presente en el agua. También se realiza el análisis de la DQO, siendo un indicativo esencial en cualquier estudio de CCM, se puede observar en la Ilustración 32 un esquema que representa las pruebas anteriormente descritas.



Ilustración 32: Esquema de las pruebas de calidad de agua realizadas a la Celda de Combustible Solar Microbiana.

3.6. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS A LA CELDA

Las pruebas electroquímicas fueron divididas en cinco etapas, la primera etapa de estudio se realizó a la CCM, es decir la celda de dos cámaras, separadas por una membrana de intercambio protónico de barro, con su cámara anódica, con electrolito de agua residual y ánodo de fieltro de grafito, y la cámara catódica aireada con cátodo de MnO_x, tal y como se muestra en la Ilustración 33.



Ilustración 33: Esquema representativo de conexión en la Caracterización electroquímica de la Celda de Combustible Microbiana.

Se llevó a cabo la caracterización de la Celda de Combustible Solar Microbiana (CCSM), se realizó con el fotoánodo de TiO₂, como se puede apreciar en la llustración 34. En este arreglo de caracterización, fueron realizadas las pruebas en presencia y ausencia de luz con la lampara de Xenón.



Ilustración 34: Esquema representativo de conexión en la Caracterización electroquímica de la Celda de Combustible Solar Microbiana.

La siguiente caracterización con el Potenciostato-Galvanostato fue realizado el estudio de la cámara anódica de la CCSM, fue añadido en la cámara anódica un electrodo de referencia de Calomel, esta prueba solo fue realizada en el ánodo ya que el cátodo es un sistema aireado.



Ilustración 35: Esquema representativo de conexión de la cámara anódica de la caracterización electroquímica con electrodo de Calomel de la Celda de Combustible Solar Microbiana.

La cuarta etapa consistió en el estudio de la Celda de Combustible Fotocatalítica, es decir la Celda donde se cuenta con el Fotoánodo de Dióxido de Titanio con Etil-Celulosa al 2.0% y el cátodo de MnO_x. Las CCF son dispositivos que al igual que las CCM su objetivo es la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales, pero a diferencie de las CCM, uno de los mayores beneficios es la remoción de contaminantes persistentes en el agua, debido al efecto fotocatalítico se puede considerar como un tratamiento de tercera generación. Por otro lado, la principal desventaja en comparación con la CCM es que solo pueden operar en presencia de luz ultravioleta, escalándolo a una planta de tratamiento puede ser un inconveniente ya que solo podría operar de día. Abre la oportunidad de utilizar la CCSM, como un sistema capaz de eliminar contaminantes emergentes, por la parte

fotocatalítica, pero con la ventaja de operación en la noche con el sistema microbiano. En la siguiente ilustración (Ilustración 36), se muestra el esquema de la conexión para la caracterización de la CCF.



Ilustración 36:Esquema representativo de conexión de la caracterización electroquímica de la Celda de Combustible Fotocatalítica.

Al igual que la CCSM, se realizó a la CCF el análisis de la cámara anódica con el apoyo del electrodo de referencia de Calomel, recordando que dicha prueba solo se realiza a la cámara anódica porque el cátodo es aireado, con el fin de conocer mejor el desempeño del fotoánodo en la CCF, y también en la CCSM.



Ilustración 37:Esquema representativo de conexión para la caracterización electroquímica de la cámara anódica con electrodo de referencia de la Celda de Combustible Fotocatalítica.

Se realizaron los siguientes experimentos en el Potenciostato Galvanostato (SP-300 Biologic):

- Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés).
- Voltamperometría de barrido lineal (LSV).
- Voltaje a Circuito Abierto (VCA) Galvanostatica (GLV) de descarga.

Estas pruebas son de suma importancia de desarrollar para el estudio de la Celda, ya que los métodos electroquímicos proporcionan numerosa información que describen el estado de la biopelícula y sus propiedades, incluida la cinética del crecimiento, la transferencia de electrones interfacial / extracelular, el comportamiento redox, así como la resistencia, capacitancia e impedancia de la biopelícula, etc. (Czerwińska-Główka et al., 2020).

Las técnicas que eran utilizadas normalmente para el estudio del rendimiento de las CCM eran la voltamperometría cíclica y cronoamperometría; sin embargo, Logan et al., 2005 al igual que Zhen He et al., 2006 son pioneros en utilizar la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y las curvas de polarización anódica y catódica, utilizando el EIS para determinar la resistencia interna de las CCM y determinar las velocidades de reacción redox o características del área superficial de los electrodos (Aswin K et al., 2008).

En la investigación de procesos biofísicoquímicos por medio de la EIS en un método muy utilizado en las CCM por su alta eficiencia (Agostino V. et al., 2017). Los espectros de EIS pueden ser simulados en un circuito equivalente para calcular la Resistencia de Transferencia de Carga (Rct) y la Resistencia de la Solución (Rs) (Paula D. et al., 2018). La medición de EIS de un electrodo individual proporciona información que permite analizar las reacciones electroquímicas en los electrodos, el metabolismo bacteriano, así como las propiedades superficiales y materiales de los electrodos, que son fundamentales para comprender el proceso de generación de electricidad y la mejora de la producción de energía de MFC (He y Mansfeld, 2009).

En este trabajo se realizaron las pruebas de EIS en la CCM, la CCSM y en el ánodo de la CCSM donde fue utilizado un electrodo de Calomel como electrodo de referencia, dichas pruebas se realizaron en presencia y en ausencia de luz. Todas las evaluaciones de EIS se realizaron a PCA en un rango de frecuencia de 100 KHz a 100 mHz. La amplitud de la señal de AC aplicada fue de 10 mV. Los datos de la EIS se trazaron en forma de diagrama de Borde en los que el logaritmo del módulo de la impedancia | Z | y el ángulo de fase Φ se trazan frente al logaritmo de la frecuencia f de la señal de AC aplicada.



Ilustración 38: Caracterización electroquímica de Celda de Combustible Microbiana en Potenciostato Galvanostato (SP-300 Biologic). Al igual que la EIS, las pruebas de LSV se llevaron a cabo en la CCM, CCSM y en el ánodo de la CCSM utilizando un electrodo de Calomel saturado como electrodo de referencia, en presencia y en ausencia de luz. La prueba de LSV se realizó con un voltaje inicial de 0 V a un voltaje final de 0.05 V. Con un rango de escaneo de 0.1 mV/s y un tamaño de paso de 2 mV, con una corriente máxima de 0.3 mA, con un retraso inicial de 60 s.

En la prueba (VCA)-(GLV) de descarga se llevó a cabo al igual que la EIS y la LSV en usencia y en presencia de luz. La prueba (VCA)-(GLV) de descarga se realizó un periodo de muestra de 10 s. Con un tiempo de descarga máximo de 0.01 s. A distintos voltajes límites de descarga haciendo pruebas de 0 a 1.0V, con pasos de 0.1 V.

La Cronocoulometría es la única prueba que no fue realizada en la primera etapa de pruebas. La Cronocoulometría se realizó con un paso de voltaje previo de 0.8 V a (E_{ref}), este se dedujo de los valores obtenidos en el LSV, con un tiempo de retraso de 480 s, a un rango de voltaje de -2.5 a 2.5 V, con un tiempo de paso de 0.5 s, a un tiempo de muestra de 0.1 s. En una corriente máxima de 5 mA.

3.7. EQUIPOS Y REACTIVOS

3.7.1. Espectrofotómetro UV-VIS Thermo Scientific Evolution 201

El espectrofotómetro UV-VIS Thermo Scientific Evolution 201 (Ilustración 39), es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia. Este tipo de espectrofotometría utiliza radiaciones del campo UV de 80 a 400 nm, principalmente de 200 a 400 nm (UV cercano) y de luz visible de 400 a 800 nm, por lo que es de gran utilidad para caracterizar las soluciones en la región ultravioleta-visible del espectro. Se rige por una ley muy importante la ecuación de Beer-Lambert.



Ilustración 39: Espectrofotómetro UV-VIS Thermo Scientific Evolution 201.

3.7.2. Embudo de filtración magnético

Es un dispositivo de la marca Pall Life Sciences, cuya función es filtrar líquidos como se muestra en la Ilustración 40, las ventajas de la utilizarlo es puede llegar a ser más económico y practico que otros dispositivos, es conectado a una bomba de vacío, y a un matraz Kitasato, con filtros desechables, este procedimiento se realiza al agua residual de la celda para realizar pruebas de calidad del agua posteriores, ya que la presencia de materia solida daña los equipos, y el filtrado no interfiere en la calidad de los resultados.



Ilustración 40:Embudo de filtración magnético marca Pall Life Sciences.

3.7.3. Medidor de pH y conductividad/TDS portátil

Este equipo es utilizado durante la investigación para realizar pruebas de calidad del agua de pH, conductividad, resistividad, sólidos disueltos totales (TDS) y temperatura, se puede observar el equipo en la ilustración 41.



Ilustración 41:Medidor de pH y conductividad/TDS portátil HACH - HQ30D - 53101201.

3.7.4. Viales de digestión para DQO de alto rango

Los viales son utilizados para la determinación de la DQO con el método de digestión del reactor. Método Hach 8000. Rango alto plus: 200 a 15 000 mg/L de DQO (Ilustración 42), los cuales son utilizados para analizar las muestras de agua residual de la celda, iniciado el proceso de la celda y también al finalizar. Las muestras se analizaron con esta técnica previo filtrado con el embudo de filtración magnético.



Ilustración 42: Viales de digestión para DQO, rango alto plus, de 200 a 15 000 mg/L de DQO.

3.7.5. Reactor de digestión para DQO

El reactor de digestión de dos bloques de calentamiento para uso en DQO, Nitrógeno Total, Cromo Total, TOC y Fósforo Total, entre otros. Es utilizado para análisis de metales, digestiones para análisis de nutrientes, o muestras biológicas En este trabajo se ha utilizado para poner en digestión los viales de DQO con agua residual, anteriormente mencionados, son colocados en el reactor como se observa en la ilustración 43.



Ilustración 43:Reactor de digestión para DQO doble block Hach DRB200.

3.7.6. Espectrofotómetro de mesa

Con ayuda de este equipo (Ilustración 44) es posible realizar la medición de los viales son utilizados para la determinación de la DQO con el método de digestión del reactor, entre muchas otras pruebas.



Ilustración 44:Espectrofotometro De Mesa Hach (S/RFID).

3.7.7. Carbono Orgánico Total

El COT engloba la suma de todos los compuestos orgánicos presentes en la muestra de agua residual en este caso. La medida del COT es más que una forma rápida y simple para la determinación del contenido de compuestos orgánicos en una muestra. Dada la gran cantidad de sustancias orgánicas presentes, en aguas residuales, es prácticamente imposible de identificar y cuantificar individualmente, su medida global expresada como COT es la única forma de llegar a una conclusión sobre el nivel real de contaminación por compuestos orgánicos en este tipo de muestras, los cuales son analizados en el equipo marca Shimadzu TOC-L (Ilustración 45).



Ilustración 45: Analizador de carbono orgánico total por oxidación catalítica TOC-L Shimadzu.

3.7.8. Potenciostato/Galvanostato

Las pruebas electroquímicas tanto de la CCM, como de los fotoánodos fueron realizadas con el Potenciostato/Galvanostato marca BioLogic, que permite realizar ensayos de corrosión en medios líquidos a temperatura ambiente, también se puede medir alta resistencia eléctrica (hasta Gigaohm) de películas delgadas de DLC. El equipo es capaz de realizar análisis de corrosión en sólidos en ambientes húmedos e Impedancia Electroquímica (Ilustración 46).



Ilustración 46:Potenciostato/Galvanostato marca BioLogic® utilizado en pruebas electroquímicas.

3.7.9. Fuente de iluminación

La fuente de iluminación que se empleó es una lámpara de Xenón de arco de aproximadamente 5800 K con potencia de 75 W de la marca Newport® con una curva espectral de 180 a 2500 nm de longitud de onda. Se utilizó una fuente de poder universal para lámparas de arco 68805 de la marca ORIEL® (40-200 W) y un Housing (carcasa) para lámparas de arco 66002 (30-250 W) también de la marca ORIEL® (Ilustración 47).



Ilustración 47:Fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport®, Carcasa para lámparas de arco 50-250 W y Fuente de alimentación universal (40-200 W) ORIEL®Corporation).

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CCSM

El primer resultado obtenido fue el prototipo experimental de la CCSM (Ilustración 48, A), con la necesidad de un diseño seguro de fugas en la cámara anódica, y con aireación en la catódica, posible de realizar en acrílico con cortes laser. Tomando en cuenta parámetros como el volumen de la celda, el tamaño de los electrodos, una tapadera para evitar pérdidas de agua en el ánodo, pero con salidas para los electrodos, utilizando la tapadera como soporte de los electrodos, que contara con una ventana de cuarzo circular para llevar a cabo la iluminación de la celda con la lámpara de Xenón, de esta manera el diseño CAT se realizó con el apoyo de SolidWorks (Ilustración 12). De esta manera y con la finalidad de repetitividad se realizaron por duplicado las celdas para mejor incertidumbre en la experimentación y resultados. Gracias al diseño y construcción de dichas celdas es que se pueden convertir un solo prototipo en tres tipos de celdas diferentes como lo son la CCM, la CCF y la CCSM con sencillos cambios en los electrodos y sus combinaciones, como se muestra en la Ilustración 49, B, C, D.



Ilustración 48: A) CCSM irradiada por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport). Esquema representativo de la Celda construida que puede funcionar como B) CCSM, C) CCM, D) CCF.

4.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PELÍCULAS DE TIO₂ A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ETIL-CELULOSA.

Se preparó Dióxido de Titanio por el método de Sol-Gel, el cual fue depositado sobre vidrio conductor con una película de *FTO*, por el método de Dip Coating, el TiO₂ fue preparado con seis diferentes concentraciones de Etil-Celulosa con concentraciones de 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% y 2.5%.

4.2.1. Discusión de los resultados de transmitancia UV-VIS de las Películas de TiO₂ a diferentes concentraciones de Etil-Celulosa.

En la siguiente llustración se muestra el porcentaje de transmitancia de área bajo la curva, realizada con el espectrómetro UV-VIS, de las seis diferentes películas de Etil-Celulosa, el primer punto es al 0.0% de Etil-Celulosa, se puede observar que su porcentaje de transmitancia es alto, por lo cual no hay una absorbancia de la luz ultravioleta considerable del material, conforme va aumentando el porcentaje de Etil-Celulosa va disminuyendo el porcentaje de transmitancia.

Este parámetro a analizar es de suma importancia para este prototipo de CCSM, ya que, al momento que es irradiado el fotoánodo con la lámpara de Xenón, se debe de absorber la mayor cantidad por el fotoánodo, la energía UV la que puede afectar directamente a la formación y estabilidad de la biopelícula del ánodo de la CCSM. Hay que recordar que la luz ultravioleta es un método para la desinfección de efluentes, pero también es la fuente de energía que requiere el fotoánodo de TiO₂ para ser excitado. Utilizando esta metodología se ha obtenido una reducción de más del 99% de bacterias heterótrofas mediante la irradiación de efluentes de lodos activados convencionales con luz ultravioleta (254 nm) (BG Oliver et al., 1975).

En la ilustración 49 se muestra el gráfico del %T_{190-1100nm} observando una %T_{190-1100nm} mayor del TiO₂ con 0.0% de Etil Celulosa (aproximadamente 70%). Como puede observarse después de 2.0% de contenido de Etil Celulosa no se observa una menor transmitancia por parte de los recubrimientos, por esta razón fueron descartadas las películas de 2.5% de Etil-Celulosa para su estudio. Estos resultados fueron útiles para tomar la decisión de que las concentraciones de Etil-Celulosa 0.0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% no eran opciones viables para usarse fotoánodo en la

CCSM, porque estas presentan una transmitancia promedio considerable y como ya se ha discutido antes, esto podría ocasionar un posible daño a los microorganismos presentes en el ánodo microbiano.



Ilustración 49: Porcentaje de Transmitancia (190-1100 nm) representado en área bajo la curva de Películas de TiO₂ en función a la concentración de Etil Celulosa.

4.2.2. Discusión de los resultados de pruebas Electroquímicas de las Películas de TiO₂ con Etil-Celulosa.

Tal como se menciona en el Capítulo III, fueron realizadas pruebas electroquímicas a las películas de TiO₂, entre estas técnicas se encuentra la Voltamperometría de Barrido Lineal, como se muestra en la ilustración 50. En este método, la aparición de foto-respuestas positiva en el potencial, muestra un semiconductor tipo n. Para semiconductor típico de tipo n, la fotocorriente se origina en el suministro de foto huecos al semiconductor / electrolito interfaz durante la iluminación (Jumeri FA et al., 2014).



Ilustración 50: Voltamperometría de barrido lineal (LSV por sus siglas en inglés); A) Concentración de 2.0% de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂; B) Concentración de 2.5% de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂.

Para garantizar una capacitancia que sea aportada principalmente por los materiales activos en la medición, se realiza una prueba de Voltámetria cíclica, donde se puede observar un comportamiento capacitivo, las señales corresponden a la respuesta característica del TiO₂, siendo la de mejor señal la película B) 2.5% de Etil-Celulosa, con un valor próximo de corriente a los 12 mA/cm², tal como se muestra en la llustración 51.



Ilustración 51: Curvas de Voltámetria cíclica en distinta concentración de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂: A) Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂ al 2.0%, B) Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂ al 2.5%.
En la Ilustración 52 se muestra la cronoamperometría realizada a los materiales, con intervalos de tiempo con iluminación y sin iluminación para conocer su foto respuesta, se puede claramente observar en las gráficas que los materiales estudiados presentan una excelente foto respuesta, obteniendo una mayor foto-corriente generada en el periodo de iluminación de hasta 0.3 mA/cm2 en las películas con 2.0% de Etil-Celulosa (A) con respecto a las películas con 2.5% de Etil-Celulosa (B).



Ilustración 52:Curvas de Cronoamperometría en distinta concentración de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂: A) Etil-Celulosa al 2.0%, B) Etil-Celulosa al 2.5%.

En la llustración 53 se muestran las gráficas de los fotoánodos de TiO₂ con diferentes concentraciones de Etil-Celulosa. realizadas con el Potenciostato/Galvanostato marca BioLogic® de la técnica de Voltaje a Circuito Abierto, con la estimulación periódica de luz UV artificial generada por una lámpara de Xenón marca ORIEL y con lapsos de oscuridad. Este tipo de materiales se espera tener un comportamiento de tipo aleta coloquialmente conocido, tal cual se muestra en las gráficas. Se aprecia que cuando el material no está irradiado con luz, se logra ver un comportamiento casi lineal del potencial de equilibrio, alrededor de un valor de 0.3 V vs SCE lo cual está asociado con la energía de fermi del material, es decir, se puede relacionar la energía donde los electrones permanecen estables en la banda de valencia. Sin embargo, hay que recordar que este potencial está afectado por la interface del FTO, rigurosamente, este potencial describe una hetero unión entre el potencial del FTO y la banda de valencia del semiconductor.

En cambio, cuando las películas son irradiadas con la lámpara de Xenón, los electrones se promueven a la banda de conducción, y por ello el OCV se desplaza a valores más negativos, alrededor de entre -0.15 V vs SCE hasta alcanzar un equilibrio, lo cual indica que los electrones han llegado al nivel de fermi más elevado. Finalmente, al apagar la luz el OCV regresa a su valor original y varía de manera asintótica hasta alcanzar el equilibrio nuevamente, lo cual está relacionado a la recombinación de los pares hueco/electrón.



Ilustración 53:Voltaje de Circuito Abierto en distinta concentración de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂: A) Etil-Celulosa al 2.0%, B) Etil-Celulosa al 2.5%.

Basados en los resultados obtenidos en el Potenciostato y del Espectrofotómetro UV-VIS de las películas de Etil-Celulosa en solución Sol-Gel de TiO₂ a concentración de 2.0% y 2.5%, se puede concluir que para la creación de un fotoánodo que sea utilizado en una CCSM, la finalidad de aumentar el desempeño en la generación de energía eléctrica y el tratamiento del agua residual en comparación con la CCM, la concentración más recomendable de Etil-Celulosa es la de 2.0%, siendo la concentración seleccionada es la concentración que se replicó para la CCSM.

4.2.3. Discusión de Imágenes SEM de las Películas de TiO₂ a concentración de 2.0% Etil-Celulosa.

La morfología de las películas se estudió mediante Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés). La Ilustración 54, muestra las imágenes SEM de la película de TiO₂ con una concentración de 2.0% Etil-Celulosa. Se

observan en la llustración 54 (A), las partículas de TiO₂ con Etil-Celulosa, en la película con un tamaño menor a 100 nm en promedio de los granos, existiendo diferentes tamaños, y siendo no uniformes. Así mismo, puede observarse que la superficie de las películas no es uniforme, sin embargo, se espera que al tener una suficiente homogeneidad y las características fotoeléctricas sea adecuada, esto se estudió en temas anteriores. En la Ilustración 54 (B) se puede apreciar el espesor de la película de TiO₂ con una concentración de 2.0% Etil-Celulosa, de 840 nm, dicho espesor se logró con cuatro inmersiones en el sistema de Dip-Couting. El espesor de la película de TiO₂ en concentración de 2.0% Etil-Celulosa, es de vital importancia en la CCSM, debido a que un grosor excesivo podría no ser muy eficiente en el proceso de fotocatálisis, mientras que la falta de un espesor considerable puede afectar a la absorción de la luz UV, permitiendo que sea transmitida hacia la Biopelícula, sabiendo que la luz UV, es utilizada para el tratamiento de aguas residuales por su energética longitud de onda, puede dañar al sistema bacteriano del ánodo. Así mismo, se puede observar un espesor de 257 nm de la película de FTO lo cual es coherente con lo publicado por Chowdhury et al., 2013, dado los resultados podemos concluir que el grosor obtenido de las cuatro inmersiones es suficiente para no permitir que este proceso suceda.



Ilustración 54:Imágenes SEM de películas de TiO₂ con Etil-Celulosa al 2.0%. (A) Partículas de TiO₂. (B) Grosor de película de TiO₂ con Etil-Celulosa.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS ELECTROQUÍMICOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

Es posible calcular el voltaje teórico mejor conocido como (E_{teo}), de las CCM. El (E_{teo}) es la diferencia entre los potenciales del ánodo (E_{an}) y del cátodo (E_{cat}) que es determinado por la ecuación de Nernst. Bajo condiciones típicas de una CCM que es a una temperatura de 293 K, un pH de 7 y una presión de 1 ATM, el potencial de un cátodo aireado es de $E_{cat} = + 0.805$ V vs electrodo de hidrógeno estándar (SCE, por sus siglas en inglés), mientras que el potencial anódico puede ser tan bajo como $E_{an} = -0,331$ V vs EHE, dependiendo del cultivo microbiano y sustrato orgánico. En este apartado se muestran los principales resultados durante la evaluación de las celdas, entendiéndose como la Celda A y la Celda B los experimentos con su respectiva replica. Cabe hacer mención que en la Celda A se evalúo el tinte del cátodo que fue elaborado con un solvente preparado en el laboratorio, mientras que la Celda B se evalúo el tinte del cátodo con solvente comercial.





El máximo valor de voltaje a circuito abierto reportado en las CCM, por la literatura es de 0.80 V (Logan, 2007) (Lefebvre O. et al., 2011), por lo que es el valor obtenido de las CCM (Ilustración 55) se considera como un buen desempeño. En la Curva de Polarización de la CCM A (Ilustración 55, A) se puede observar que el VCA es de 0.73 V, tomando en cuenta que el valor máximo reportado de 0.80 V, son

obtenidos con condiciones controladas de la celda, mientras que nuestras CCM no están controladas las condiciones como el pH, las bacterias (siendo el electrolito anódico agua residual cruda, siendo un cultivo mixto de bacterias), la temperatura de la celda y la presión atmosférica. Teniendo en la CCM B (Ilustración 55, B) un voltaje de 0.69 V, que se muestra en la curva de polarización como el punto de la fuerza electromotriz, la cual se puede definir como la fuente de voltaje ideal que impulsa la celda de combustible en su sección Ohmica y corresponde aproximadamente al VCA minorado por las pérdidas de activación. La CCM A, muestra una mayor VCA, pero la CCM B, tiene un mayor desempeño en densidad de corriente de 0.27 (mA cm⁻²), y densidad de potencia de 531 (mW m⁻²), mientras que la CCM B una densidad de corriente de 0.37 (mA cm⁻²), y densidad de potencia de 1030 (mW m⁻²).



Ilustración 56: Curva de Polarización de Celda de Combustible Fotocatalítica A y B, sin estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport).

En las ilustraciones (Ilustración 56 y 57) se muestra el desempeño obtenido de las Celdas de Combustible Solar Fotocatalítica, recordemos que estas celdas son las mismas que las microbianas con la diferencia de que no se toma en cuenta el ánodo bacteriano (se extrae el ánodo de la celda) y se utiliza como único ánodo el fotoánodo de TiO₂, en estas ilustraciones se puede apreciar claramente cómo las

celdas tienen un significativo aumento en la densidad de corriente y densidad de potencia, cuando se es estimulado el fotoánodo con la lámpara de xenón (Ilustración 57). La CCF A, pasa de densidad de corriente de 0.11 (mA cm⁻²) y densidad de potencia de 367 (mW m⁻²) a densidad de corriente de 0.45 (mA cm⁻²) y densidad de potencia de 581 (mW m⁻²). La CCF B, tiene valores sin luz de la densidad de corriente de 0.26 (mA cm⁻²) y densidad de potencia de 520 (mW m⁻²), y con luz la densidad de corriente es 0.74 (mA cm⁻²) y densidad de potencia es 1221 (mW m⁻²). Tal efecto se puede explicar ya que la corriente fluye cuando el circuito se cierra, y el potencial del ánodo aumenta, al igual que el potencial del cátodo disminuye, debido a la polarización, lo que sucede es que los potenciales de ambos electrodos se acercan entre sí y el voltaje de la celda disminuye debido a pérdidas inevitables, que es también conocido como sobrepotencial. Estas pérdidas pueden ser definidos como la polarización de activación, las pérdidas óhmicas, y polarización de la concentración. La polarización de activación está directamente asociada con una cinética de electrodos lenta y es predominante a bajas densidades de corriente. A altas densidades de corriente, los reactivos se consumen rápidamente en los electrodos, lo que da como resultado gradientes de concentración y limitaciones de transferencia, un fenómeno conocido como polarización de concentración. A densidades de corriente intermedias, predominan las pérdidas óhmicas que reflejan la resistencia interna de la celda. Esta zona intermedia corresponde a la "zona de trabajo" de la CCM y es de primordial importancia en términos de caracterización de la CCM (Lefebvre O. et al., 2011). Mientras que los voltajes a circuito abierto se mantienen próximos, en la CCF A sin presencia de luz reporta 0.49 V, mientras que con presencia de luz 0.57. En la CCF B sin presencia de luz se tiene un valor de VCA de 0.63 V, y la celda con luz da un desempeño de 0.56 V. Se puede concluir que en la CCF no se ve un cambio significativo en el VCA con la ausencia y presencia de la lampara de xenón, pero si se tiene un cambio significativo en la densidad de corriente y densidad de potencia.



Ilustración 57: Curva de Polarización de Celda de Combustible Solar Fotocatalítica A y B, con estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport).

En las Ilustraciones 58 y 59 se muestran las curvas de polarización de la CCSM. esta celda es la configurada con el cátodo aireado de MnOx, y dos ánodos, el microbiano de fieltro de grafito y el fotoánodo de TiO₂ con Etil-Celulosa al 2.0%. En la llustración 58 se muestran los resultados obtenidos de las celdas, pero sin la estimulación de la lámpara, en el fotoánodo. La CCSM A, tiene un VCA de 0.56 V, una densidad de corriente de 0.37 (mA cm⁻²) y densidad de potencia de 522 (mW m⁻²). La CCSM B, reportó 0.70 V, 0.33 (mA cm⁻²) y 1053 (mW m⁻²). La Ilustración 59 muestran los resultados de las celdas con la estimulación de la lámpara XE 75W Neport en el fotoánodo, teniendo un excelente desempeño, a primera vista se puede observar claramente un aumento en la densidad de potencia y de corriente de ambas celdas. La CCSM A, con la estimulación de la lámpara, alcanzó 0.54 V, 0.35 (mA cm⁻²) y 903 (mW m⁻²). La CCSM B, con la presencia de la lámpara obtuvo de VCA 0.68 V, una densidad de corriente de 0.42 (mA cm⁻²) y densidad de potencia de 1489 (mW m⁻²). Se aprecia un comportamiento similar a la CCF, donde, no se tiene un cambio significativo en el VCA, pero si en la densidad de potencia y de corriente.



Ilustración 58: Curva de Polarización de Celda de Combustible Solar Microbiana A y B, sin estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport).



Ilustración 59: Curva de Polarización de Celda de Celda de Combustible Solar Microbiana A y B, con estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport).

4.3.1. Discusión de los resultados de Voltaje de la Descarga Galvanostatica (VDG) de la CCSM

Los perfiles de Voltaje de la Descarga Galvanostatica de la celda, se realizaron aplicando un pulso VDG, en este proceso ocurre una caída óhmica (ΔV_{ohmic}) que está relacionada con la Resistencia en Serie Equivalente (RSE) de la celda que, a su vez, se ve afectada por las resistencias óhmicas del electrodo y componentes electrolíticos de la celda (*Santoro C et al., 2016*). El VDG fue evaluada a una descarga total en un periodo de 10 s, de 1 mA a 45 mA, llegando a la descarga completa del voltaje.

El exceso de cargas negativas y positivas, en el polarizado de las superficies de ánodo y cátodo respectivamente, está equilibrada por iones positivo y contraiones negativos provenientes de las especies iónicas disueltas en la solución. Los iones de electrolitos migran a los electrodos cargados de manera opuesta, los cuales forman una doble capa electroquímica en toda la superficie expuesta del electrodo carbonoso de la celda. La celda almacena una carga electrostática en V_{max}, circuito abierto (CA). El ánodo y el cátodo de la celda pueden ser luego descargado por un proceso electrostático rápido. En su superficie las cargas se neutralizan y los iones liberan las cargas en la solución de aguas residuales (Santoro C et al., 2016).

La monitorización de los potenciales de los electrodos de la celda durante el pulso permitió identificar al cátodo como el principal contribuyente de ΔV_{ohmic} y, por tanto, de RSE para las celdas. Estos valores fueron calculados teniendo en cuenta que el voltaje de celda más alto factible (V_{max}) es el voltaje de la celda cargada en condiciones de circuito abierto (V_{max}, CA) la cual disminuyó en ΔV_{ohmic} después del pulso, que a su vez depende de las diferentes corrientes i_{pulse} (Santoro C et al., 2016).



Ilustración 60: Descarga de Voltaje a Circuito Abierto de Celda de Combustible Fotovoltaica A y B, sin estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport), cámara anódica – Descarga Galvanostática a diferentes corrientes (ipulse) desde 1 mA hasta 45 mA en 10 s, hasta descarga completa del voltaje de la celda a 0V.

La descarga de voltaje a circuito abierto, fue calculada únicamente en el ánodo, ya que el cátodo es un sistema aireado, en una comparativa con el trabajo de Santoro et al., 2016, en ambos casos la cámara anódica representa sobrepotenciales muy bajos dentro de unos pocos mV (contabilizados en menos del 10% del total de la celda ΔV_{ohmic} y RSE). Esto sugiere que el uso de escobillas de carbón de alta superficie y alta conductividad contribuyó a una impedancia de ánodo muy baja que variaba en un rango pequeño de 4–13 Ω , en el caso de su trabajo y en nuestro caso el fieltro de grafito igual cuenta con una impedancia muy baja.



Ilustración 61: Descarga de Voltaje a Circuito Abierto de Celda de Combustible Solar Microbiana A y B, con estimulación por la fuente de iluminación (Lámpara XE 75W Neport), cámara anódica – Descarga Galvanostática a diferentes corrientes (ipulse) desde 1 mA hasta 45 mA en 10 s, hasta descarga completa del voltaje de la celda a 0V.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE SOLAR MICROBIANA

Como ya fue mencionado en el capítulo de Metodología, el agua residual utilizada en la CCSM fue recolectada de la planta de tratamiento de la UPA, y el agua residual a finalizar el proceso de ambas CCSM, fueron analizadas utilizando diferentes técnicas analíticas como la Demanda Química de Oxígeno y el Carbón Orgánico Total. Utilizando estás técnicas dan como resultado un DQO de 181 mg/L de la muestra inicial, es decir, el agua residual de la planta de tratamiento fue colocado en ambas celdas y el sobrante fue almacenado en un refrigerador. El analizar esta agua nos permitirá conocer el estado inicial de cómo ingresó el agua a las celdas, para analizar las finales y realizar un comparativo de la muestra inicial y final. El agua tiene un alto contenido de material susceptible a la oxidación suspendido en el agua, lo cual es de esperarse por ser agua residual cruda.

El resultado obtenido de DQO después del proceso usando la CCSM A, fue de 181 mg/L de DQO, se puede apreciar una diferencia significativa a la muestra inicial teniendo una diferencia de 163 mg/L, esto indica que la CCSM A tiene un alto rendimiento en la eliminación de la materia orgánica, ya que el DQO es un parámetro que señala cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua.

La muestra de agua final de la CCSM B brindó un resultado de 10 mg/L de DQO, teniendo una diferencia de 171 mg/L de la muestra inicial, siendo una diferencia significativa al igual que la CCSM A, en este caso las dos celdas se pueden considerar igual de buenas en la eliminación de materia orgánica del agua residual ya que entre ellas solo hay una diferencia de 8 mg/L, no siendo una diferencia muy importante.

Para realizar el análisis de Carbón Orgánico Total fue necesario la filtración de las muestras por medio de un embudo de filtración magnético, como me menciona en el punto 2.1.1. del documento, un resultado importante para reportar es que, en los filtros utilizados para cada muestra de agua se puede apreciar claramente, como en la muestra inicial se cuenta con una mayor cantidad de materia orgánica

suspendida, mientras que en las muestras finales de ambas celdas los filtros están prácticamente libres de materia orgánica, solamente se pueden apreciar unas manchas marrones las cuales son producto de la biopelícula formada en ambas celdas, también se puede apreciar como las muestras de agua son mucho más claras las de las muestras finales en comparación con la muestra inicial, esto puede observarse en la Ilustración 62.



Ilustración 62: Muestras de Agua A) Inicial, B) Final CCSM A, C) Final CCSM B, y sus respectivos filtros usados.

Las muestras ya filtradas fueron analizadas en el equipo de COT. El COT es un indicador de la cantidad de materia orgánica restante de la descomposición de plantas, crecimiento bacteriano o procedente de actividades metabólicas de organismos vivos, al igual que de compuestos químicos. Los resultados obtenidos por esta técnica nos indica que los contaminantes orgánicos presentes en la muestra inicial son significativamente superiores a las muestras finales, y que la CCSM A, tiene una menor cantidad de estos contaminantes respecto a la CCSM B y se observa una clara disminución en ambas celdas de COT respecto a la muestra inicial, indicando que ambas celdas son eficientes en el tratamiento de aguas residuales.

CONCLUSIONES

La película de TiO₂ con una concentración de Etil-Celulosa al 2.0% demostró tener mejores resultados para la aplicación de fotoánodo en la CCSM, por sus características electroquímicas y espectrofotométricas, respecto a otras concentraciones de Etil-Celulosa estudiadas. La CCSM obtuvo un mejor desempeño en la generación de corriente eléctrica, con la estimulación de la luz en el fotoánodo, obtuvo un desempeño en el voltaje a circuito abierto de 0.68 V, una densidad de corriente de 0.42 mA cm⁻², una densidad de potencia de 1489 mW cm⁻², mientras que la CCM obtuvo como resultado un voltaje a circuito abierto de 0.69 V, una densidad de corriente de 0.37 mA cm⁻², densidad de potencia de 1030 mW cm⁻². No se ve una diferencia significativa en el voltaje de la celda pero si en la densidad de potencia y la densidad de corriente.

Los resultados obtenidos en la descarga de voltaje a circuito abierto, por el método de descarga galvanostática nos indica que la CCSM puede ser un sistema supercapacitivo, pero al momento de solo examinar la cámara anódica de la celda representa un sesgo en la infestación de la celda, ya que los resultados obtenidos en el ánodo mostraron tener una alta superficie y conductividad, causando una baja impedancia.

En los resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual fueron realmente significativos, teniendo un desempeño extraordinario de la CCSM en al tratamiento de aguas residuales con una eficiencia del 94.5% en la eliminación de materia orgánica del agua residual.

Las CCSM, no se encuentran reportadas en la literatura, y este primer estudio nos muestra que el acoplamiento de las tecnologías de CCM y la Fotocatálisis Heterogénea, son una buena opción para proponer un nuevo tipo de celda "Híbrida", con esto se comprueba la hipótesis de que la CCSM aumenta la eficiencia, tanto electroquímica como en el tratamiento de agua residual, abriendo un nuevo campo de investigación dentro de las Celdas de Combustible y de la Fotocatálisis. También se plantea a las CCSM como una muy buena opción para el tratamiento de aguas residuales, esto basado en el hecho de que, como ha sido reportado ampliamente

en la literatura, una limitante de las CCM, es que no son la mejor opción para el caso del tratamiento de contaminantes persistentes en el agua, mientras que las CCSM podrían ser una posible solución para llevar a cabo este tipo de tratamientos. Así mismo, podría evaluarse la eficiencia de este tipo de celdas en el tratamiento de otro tipo de contaminantes inorgánicos, como lo son colorantes textiles, entre muchos otros tipos de contaminantes que son eficazmente eliminados por medio de la fotocatálisis, siendo una gran área de oportunidad de la CCM.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliamente la creación de un sistema, que no solo sea experimentado bajo los efectos de la luz solar artificial, que sea más robusto y pueda implementarse en la intemperie, utilizando la luz solar, que cuente con tecnología de concentración solar, o un sistema de seguimiento solar y que también cuente con un sistema de flujo para que la fotocatálisis heterogénea sea más eficiente.

Utilizar menos variables en la experimentación, por ejemplo, utilizar un solo tipo de tinta conductiva, realizar la experimentación enfocado en el desempeño de la CCSM, comparado solo con la CCM.

Contar con un mínimo de tres sistemas idénticos para pruebas replicadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostino V. et al. (2017). Electrochemical analysis of microbial fuel cells based on enriched biofilm communities from freshwater sediment. *Electrochimica Acta*.
- Aguado et al. (1994). Influence of light intensity and membrane properties. *Journal of Molecular Catalysis*, 165-178.
- Ahmad S et al. (2017). Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89-108.
- Aswin K et al. (2008). The polarization behavior of the anode in a microbial fuel cell. *Electrochimica Acta Volume 53*, 3508-3513.
- Bai at el. (2016). A solar light driven dual photoelectrode photocatalytic fuel cell (PFC) for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Journal of Hazardous Materials*, 51-62.
- Baraton, M.-I. (2003). *Synthesis, Fuctionalization and Surface Treatment of Nanoparticles.* California: American Scientific Publishers.
- Bennetto, A. y. (1993). Microbial fuel-cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology volume 39*, 27–40.
- Bergamini et al. (2009). Heterogeneous photocatalytic degradation of reactive dyes in aqueous TiO₂ suspensions: Decolorization kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 215-220.
- BG Oliver et al. (1975). The disinfection of sewage treatment plant effluents using ultraviolet light. *The Canadian Journal of Chemical*, 170-174.
- Chowdhury et al. (2013). Colloidal Properties and Stability of Graphene Oxide Nanomaterials in the Aquatic Environment. *Environ. Sci. Technol*, 6288–6296.
- Chowdhury et al. (2013). Optical transmission enhancement of Fluorine doped Tin Oxide (FTO) on glass for thin film photovoltaic applications . *Energy Procedia* 42, 660 669.
- Czerwińska-Główka et al. (2020). A journey in the complex interactions between electrochemistry and bacteriology: From electroactivity to electromodulation of bacterial biofilms. *Bioelectrochemistry*, 107401.
- Deutzmann J. et al. (Published: 01 November 2016 de Published: 01 November 2016 de 2016). Enhanced microbial electrosynthesis by using defined co-cultures. *The ISME Journal*, 704–714.
- Dwivedi, S. (2016). Electricity generation in membrane-less single chambered microbial fuel cell. International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM).
- Hai-Liang et al. (2019). Electron transfer mechanisms, characteristics and applications of biological cathode microbial fuel cells A mini review. *Arabian Journal of Chemistry*, 2236-2243.

- Hindatu Y. et al. (2017). Mini-review: Anode modification for improved performance of microbial fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 236-248.
- Jadhav et al. (2017). Enhancing the performance of single-chambered microbial fuel cell using manganese/palladium and zirconium/palladium composite cathode catalysts. *Bioresource Technology Volume 238,,* 568-574.
- Jing Baia et al. (2016). A solar light driven dual photoelectrode photocatalytic fuel cell (PFC)for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Journal of Hazardous Materials*, 51–62.
- Joseph M. et al. (2018). Biofilm Engineering Approaches for Improving the Performance of Microbial Fuel Cells and Bioelectrochemical Systems. *Front. Energy Research*.
- Jumeri FA et al. (2014). Titanium dioxide-reduced graphene oxide thin film for photoelectrochemical water splitting. *Ceramics International Volume 40*, 15159-15165.
- Kamaraj et al. (2017). Sustainable Power Production from Plant-Mediated Microbial Fuel Cells. Sustainable Agriculture towards Food Security, 85-107.
- Kamaraj S. et al. (2019). Electricity generation from Nopal biogas effluent using a surface modified clay cup (cantarito) microbial fuel cell. *Heliyon*.
- Kim et al. (1999). Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium. *Shewanella putrefaciens. J. Microbiol. Biotechnol. 9*, 127–131.
- Lefebvre O. et al. (2011). Microbial fuel cells for energy self-sufficient domestic wastewater treatment—a review and discussion from energetic consideration. *Applied Microbiology and Biotechnology volume 89*, 259–270.
- Logan et al. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research Volume 39*, 1675-1686.
- Logan, B. E. (2007). Microbial Fuel Cells. Nee Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- M. Li et al. (2019). Recent advances on photocatalytic fuel cell for environmental applications— The marriage of photocatalysis and fuel cells. *Science of The Total Environment*, 966-978.
- Mansfeld, H. y. (2009). Exploring the use of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in microbial fuel cell studies. *Energy & Environmental Science*, 141–240.
- Nordin et al. (2020). Hydroxyl radical formation in the hybrid system of photocatalytic fuel cell and peroxi-coagulation process affected by iron plate and UV light. *Chemosphere*.
- Park. Zeikus. (2001). Improved Fuel Cell and Electrode Designs for Producing Electricity from Microbial Degradation. *Biotechnology and bioengineering*, 348 - 355.
- Paula D. et al. (2018). Modification of carbon felt anode with graphene oxide-zeolite composite for enhancing the performance of microbial fuel cell. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 77-82.

- R. Kumar et al. (2015). Exoelectrogens in microbial fuel cells toward bioelectricity generation: a review. *International Journal of Energy Research Volume39, Issue8*, 1048-1067.
- Rahimnejad M. et al. (2014). A review on the effect of proton exchange membranes in microbial fuel cells. *Biofuel Research Journal 1*, 7-15.
- Revelo et al. (2013). MICROBIAL FUEL CELLS (MFCS): A CHALLENGE FOR THE REMOVAL OF ORGANIC MATTER AND ELECTRICITY GENERATION. *La Serena*.
- Rosenbaum et al. (2010). Light energy to bioelectricity: photosynthetic microbial fuel cells. *Current Opinion in Biotechnology*, 259-264.
- Santoro C et al. (2016). Self-powered supercapacitive microbial fuel cell: The ultimate way of boosting and harvesting power. *Biosensors and Bioelectronics*, 229–235.
- Santoro et al. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 225-244.
- Shahbazi F. et al. (2018). MnOx-based electrocatalysts for enhanced oxygen reduction in microbial. *Journal of Power Sources*, 45-53.
- Smita S. et al. (2019). Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. *Fuel*, 115526.
- Sonawane R et al. (2004). Preparation and photo-catalytic activity of Fe–TiO2 thin films prepared by sol–gel dip coating. *Materials Chemistry and Physics*, 52–57.
- Tian et al. (2020). Energy capture from thermolytic solutions and simulated sunlight coupled with hydrogen peroxide production and wastewater remediation. *Water Research*.
- Wang et al. (2018). Open external circuit for microbial fuel cell sensor to monitor the nitrate in aquatic environment. *Biosensors and Bioelectronics*, 97-101.
- Wang et al. (2014). Solar photocatalytic fuel cell using CdS–TiO2 photoanode and air-breathing cathode for wastewater treatment and simultaneous electricity production. *Chemical Engineering Journal*, 174-182.
- Wang Z. et al. (2017). Progress of air-breathing cathode in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 1 11.
- Yasri N. et al. (2019). The electrochemical perspective of bioelectrocatalytic activities in microbial electrolysis and microbial fuel cells. *Energy Reports*, 1116-1136.
- Yousef V. et al. (2017). Ceramic-based microbial fuel cells (MFCs): A review. *International Journal* of Hydrogen Energy, 1672-1690.
- Zhen He et al. (2006). An Upflow Microbial Fuel Cell with an Interior Cathode: Assessment of the Internal Resistance by Impedance Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 5212–5217.

Α

- Ácido Graso: Biomolécula de naturaleza lipídica formada por una larga cadena hidrocarbonada lineal, de diferente longitud o número de átomos de carbono, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo.
- Adenosín Trifosfato de Adenosina: Nucleótido fundamental en la obtención de energía celular. Está formado por una base nitrogenada (adenina) unida al carbono 1 de un azúcar de tipo pentosa.
- Aminoácido: Molécula orgánica con un grupo amino, son la base de las proteínas, sin embargo tanto estos como sus derivados participan en funciones celulares muy diversas. Los aminoácidos juegan un papel clave en casi todos los procesos biológicos.
- Ánodo: Electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

В	

- Biocatalítica: Palabra compuesta formada por la unión de "bio" que significa 'vida' u 'organismo vivo' y de catálisis que es el proceso por el cual se aumenta la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador y aquellas que desactivan la catálisis son denominados inhibidores.
- Biocatalizador: Es un catalizador de las reacciones bioquímicas de los seres vivos. Se consideran biocatalizadores las enzimas, las hormonas y las vitaminas.
- Biocátodo: Palabra compuesta formada por la unión de "bio" que significa 'vida' u 'organismo vivo' y de cátodo, que es un electrodo que sufre una reacción de reducción,1 mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.

- Biocidas: Sustancias químicas sintéticas o de origen natural o microorganismos que están destinados a destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier organismo considerado nocivo para el ser humano.
- Bioelectricidad: Corriente electrolítica (o corriente iónica) debido a los campos eléctricos en el exterior de la célula. Fuente de energía electrica en el interior de las células.
- Bioelectrosíntesis: Palabra compuesta formada por la unión de "bio" que significa 'vida' u 'organismo vivo' y Electrosíntesis, en química orgánica, es la síntesis de compuestos químicos en una celda electroquímica.
- Biopelícula: O Biofilm es un tapiz bacteriano o tapete microbiano es un ecosistema microbiano organizado, conformado por una o varias especies de microorganismos asociados a una superficie viva o inerte, con características funcionales y estructuras complejas.

С

- Carbohidratos: O hidratos de carbono, son moléculas altamente energéticas y fundamentales para el desarrollo de la vida, compuestas principalmente por los átomos carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O).
- Carbón Orgánico Total: Cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico y se usa frecuentemente como un indicador no específico de calidad del agua o del grado de limpieza de los equipos de fabricación de medicamentos.
- Cátodo: Electrodo que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.
- Celda de Combustible Fotocatalíca: Sistema artificial para producir H₂, energía electrica, tratamiento aguas residuales 0 de por fotodescomposición concebirse ensamblando de agua, puede un fotosensibilizador.
- Cepas Bacterianas: Población de microorganismos de una sola especie descendientes de una única célula o que provienen de una determinada

muestra en particular, la que usualmente es propagada clonalmente, debido al interés en la conservación de sus cualidades definitorias.

- Cronoamperometría: La cronoamperometría es una técnica electroquímica en la que se aumenta el potencial del electrodo de trabajo y se controla la corriente resultante de los procesos faradaicos que se producen en el electrodo en función del tiempo.
- Cuarzo: El cuarzo es un mineral compuesto de sílice.

D

- Demanda Biológica De Oxigeno: Parámetro que mide la cantidad de dioxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida. Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
- Demanda Química De Oxígeno: Parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro.
- Densidad De Corriente: Magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, es decir, intensidad por unidad de área.
- Densidad De Potencia: Potencia por unidad de Área [W/m²] o Watts por metro cuadrado.
- Descarga Galvanostatica: Permiten estudiar el comportamiento capacitivo.
 Se realiza cargando el material estudiado en una celda acuosa a una intensidad constante que se encuentre dentro de la zona capacitativa que se ha definido y restringiendo el potencial de carga y descarga.
- Dióxido De Carbono: Gas incoloro, compuesto de un átomo de carbono unido con enlaces covalentes dobles a dos átomos de oxígeno.
- Dióxido De Titanio: El óxido de titanio o dióxido de titanio es un compuesto químico cuya fórmula es TiO₂. El titanio es el noveno elemento más común en la Tierra y en condiciones normales es muy común que reaccione con

oxígeno para formar óxidos de titanio, estos se encuentran en minerales y polvos.

 Dip-Couting: Es el recubrimiento por inmersión es una forma habitual de crear películas delgadas en actividades de investigación. Las capas delgadas son aplicadas sobre un sustrato plano o cilíndrico.

Е

- Electrodo De Calomel: El electrodo de calomelanos o electrodo saturado de calomelanos es un electrodo de referencia basado en la reacción entre mercurio y cloruro de mercurio (I). La fase acuosa en contacto con el mercurio y el cloruro de mercurio (I), es una disolución saturada de cloruro de potasio en agua.
- Electrón: Es una partícula subatómica con una carga eléctrica elemental negativa. Un electrón no tiene componentes o subestructura conocidos; en otras palabras, generalmente se define como una partícula elemental.
- Electroquímica: Es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química.
- Energía Potencial: Es la energía mecánica asociada a la localización de un cuerpo dentro de un campo de fuerza o a la existencia de un campo de fuerza en el interior de un cuerpo. La energía potencial de un cuerpo es una consecuencia de que el sistema de fuerzas que actúa sobre el mismo sea conservativo.
- Energía Química: Es el potencial de una sustancia química de sufrir una reacción química para transformarse en otras sustancias. Algunos ejemplos de medios de almacenamiento de energía química incluyen baterías, alimentos y gasolina.
- Enzimas Respiratorias: Muchas de las enzimas se encuentran en el citoplasma de la célula, otros están unidas a otras células como las enzimas respiratorias que catalizan el metabolismo del acido láctico y también las sustancias derivadas al ácidos aminados y ácidos grasos.

- Espectroscopia UV-Vis: La espectroscopia ultravioleta-visible o espectrofotometría ultravioleta-visible es una espectroscopia de emisión de fotones y una espectrofotometría.
- Etil-Celulosa: Es un ingrediente utilizado en la industria de alimentos principalmente por su capacidad de espesar y generar volumen. La celulosa forma parte de las paredes celulares de cereales, frutas y verduras.
- Exoelectrógenas: Tipo de bacterias que tiene la capacidad de transferir electrones llamados exoelectrógenos, que pueden ser usados para producir voltaje en la CCM. Se sabe que algunas bacterias pueden transferir electrones afuera del sistema de la celda por un electrón aceptor, como un metal oxidado por el óxido de hierro.

F

Fijación Microbiana:Proceso que se lleva a cabo durante la creación de la biopelicula, donde las bacterias se adieren al ánodo.

- Fotoánodo: Palabra compuesta del prefijo foto-, de origen griego, es muy utilizado en la biología y significa "luz", "radiación" o "fotografía" y ánodo. Siendo un electrodo donde se lleva acabo un proceso oxidante por medio de la estimulación de radiación o luz.
- Fotocatálisis: Reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. En la química, la fotocatálisis es la aceleración de una fotorreacción en presencia de un catalizador.
- Fotomaterial: : Palabra compuesta del prefijo foto-, de origen griego, es muy utilizado en la biología y significa "luz", "radiación" o "fotografía" y material, que hace referencia a un material que reaciona con la estimulación de radiación o luz.

 Galvanotaxia: La galvanotaxis o electrotaxis se define como el movimiento orientado que experimenta un organismo móvil en respuesta a un campo eléctrico.

Μ

- Masa Transferida: Puede suceder simultáneamente con la transferancia de calor, ya sea como resultado de una diferencia de temperatura impuesta desde fuera o debido a la absorción o evolución de calor, lo cual generalmente sucede cuando una sustancia se transfiere de una fase a la otra.
- Membrana De Intercambio Catiónico: Se define como un polímero con grupos de intercambio iónico de cargas negativas (generalmente grupos – SO -, –COO-, –PO 2-) que permiten el paso de los cationes de una solución electrolítica mientras que excluyen el paso de los aniones10.
- Membrana De Intercambio Protónico: Tambien conocida como membrana de polímero-electrolito, es una membrana semipermeable generalmente hecha de ionómeros y diseñada para conducir protones mientras actúa como aislante electrónico y barrera de reactivo, por ejemplo el oxígeno e hidrógeno gaseoso.
- Microorganismos: También llamado microbio, es un ser vivo o un sistema biológico que solo puede visualizarse con el microscopio. Son organismos dotados de individualidad que presentan, a diferencia de las plantas y los animales superiores, una organización biológica elemental.
- Microscopio Electrónico De Barrido: Es un tipo de microscopio electrónico capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Aplica un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen.

Óxido De Manganeso: El óxido de manganeso o dióxido de manganeso, es un óxido iónico del manganeso. Conocido como pirolusita, es el óxido más importante del manganeso, pero no el más estable. Se utiliza en pinturas y barnices para pintar cristales y cerámica, en la obtención de cloro y yodo, y como despolarizador en pilas secas.

Ρ

- Peróxido De Hidrógeno: También conocido como agua oxigenada, dioxogen, óxido de agua o dioxidano, es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno, tal como el agua, por lo general de aspecto líquido ligeramente más viscoso.
- Peso Molecular: Sustancia dada es una propiedad física definida como su masa por unidad de cantidad de sustancia. Su unidad de medida en el SI es kilogramo por mol. Sin embargo, por razones históricas, la masa molar es expresada casi siempre en gramos por mol.
- pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones.
- Procesos Oxidativos Avanzados: Pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilo (°OH) de potencial de oxidación (E = 2.8 V) mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales (ozono, 2.07 V; peróxido de hidrógeno, 1.78 V; dióxido de cloro, 1.57 V, y cloro, 1.36 V).

	R
•	Radical Hidroxilo: • OH, es la forma neutra del ion hidróxido. Los radicales
	hidroxilo son muy reactivos y, en consecuencia, de corta duración. Forman
	una parte importante de la química radical.
	Poducción: En una reacción química que consiste en la obtensión de

 Reducción: Es una reacción química que consiste en la obtención de electrones por uno de los átomos involucrados en la reacción. El término se

0

refiere al elemento que acepta electrones, ya que el estado de oxidación del elemento que gana electrones disminuye.

 Resistencia Interna: Cualquier circuito electrónico lineal o dispositivo que suministre una corriente se puede modelar como una fuente ideal de tensión en serie con una impedancia. Este modelo ayuda a analizar la caída de tensión que ocurre por dicha impedancia al paso de la corriente.

S

- Semiconductor: Elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, por ejemplo: el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.
- SolidWorks: Software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A., para el sistema operativo Microsoft Windows.
- Sustrato: En biología, la sustancia fundamental es un conjunto de proteínas sobre las cuales se fijan las sales minerales para formar diferentes tejidos conectivos. En combinación con las fibras, forman la matriz extracelular.

Т			
Tensión De Circuito Abierto: La Tensión de circuito abierto es la diferencia de			
potencial eléctrico entre los terminales de un dispositivo cuando	lo		
desconectamos de su circuito eléctrico. En análisis de circuitos, esta	va		
relacionada con el Teorema de Thévenin.			

 Tinta Conductiva: Es una tinta que resulta que conduce la electricidad. La transformación de tinta líquida de impresión sólida puede implicar el secado, curado o fusión de los procesos.

V

- Voltaje a Circuito Abierto: Es la diferencia de potencial eléctrico entre los terminales de un dispositivo cuando lo desconectamos de su circuito eléctrico. En análisis de circuitos, esta va relacionada con el Teorema de Thévenin.
- Voltámetria Cíclica: La voltamperometría es una categoría de los métodos electroanalíticos usados en química analítica y varios procesos industriales. En voltamperometría, la información sobre un analito se obtiene midiendo la corriente cuando se modifica el potencial.
- Voltamperometría De Barrido Lineal: Método voltamperométrico en el que se mide la corriente en el electrodo de trabajo mientras se hace un barrido lineal del potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia.