



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA

PROYECTO TERMINAL

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE AGUAS
RESIDUALES**

Para obtener el grado de
Ingeniero en Electrónica

PRESENTA

Rubén Gerardo Romo Avilés

Director:

M. en C. Omar Samperio Vázquez

Pachuca de Soto, Hgo. México 16 de agosto de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 9 de julio de 2026

Número de control: ICBI-D/1309/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica **Ruben Gerardo Romo Avilés**, quien presenta el trabajo de titulación **"Diseño y construcción de una celda de combustible microbiana para su implementación en un sistema de generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver

Secretario: Dr. Kristian Freyri Maya Gress

Vocal: Mtro. Omar Samperio Vázquez

Suplente: Mtro. Víctor Eduardo Pedraza Vera

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

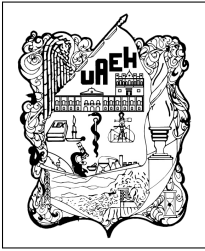
Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director de ICBI

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

GVR/MMM
"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx



Rubén Gerardo Romo Avilés

**Diseño y construcción de una
celda de combustible
microbiana para su
implementación en un sistema
de generación de energía
eléctrica a partir de aguas
residuales**

Gracias a

**Mi familia, amigos, compañeros y
maestros que fueron mis guías,
mentores y soportes emocionales
durante mi etapa en la universidad.**

Agradecimientos

La culminación de este proyecto y de mi carrera universitaria se la quiero dedicar principalmente a mi Mamá y mi hermana las cuales son el impulso que me levanta cada mañana y las cuales me apoyaron a concluir parte de este proyecto. De igual manera, quiero agradecer a mi mamá, mi tío Héctor, mi tía Viridiana, Mi tía Juana y mi tía Angélica quienes fueron mi sustento económico durante mi vida universitaria, gracias a ellos este sueño está por concluir. También quiero agradecer a Profesores y mentores que me guiaron en mi formación profesional, quienes me proporcionaron conocimientos, herramientas y experiencias que fueron fundamentales para que este y otros proyectos pudieran ser materializados. Quiero cerrar esta sección dándole gracias a mis compañeros y amigos que hice en la carrera, gracias a ellos mi estancia en la universidad fue lo más ameno que pude vivir en mi etapa formativa, gracias por todos su apoyo incondicional que me dieron en clase, los proyectos hechos en equipo, los consejos, las risas, las fiestas y gracias por cada una de las experiencias vividas.

Resumen

Las celdas de combustible microbiana (CCMs) son dispositivos electro-químicos con la capacidad de convertir un sustrato rico en materia orgánica en electricidad. su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de electrones que ocurre durante la respiración de las bacterias que se alojan en el ánodo de la celda cuando se concentran en un ambiente que no tiene presencia de oxígeno hacia el cátodo, el cual puede presentarse como otra cámara unida mediante un puente de intercambio protónico o estar directamente expuesto a exterior de la celda. La investigación desarrollada en el marco teórico en este trabajo se concentró en conocer los distintos modelos de celdas de combustible microbiana que se desarrollaron con anterioridad, con el propósito de conocer su funcionamiento, características físicas y biológicas, implicaciones y presentar los beneficios que se pueden obtener de su desarrollo e implementación.

Posterior a la investigación realizada, se planteó el desarrollo de un modelo híbrido de CCM a partir de dos modelos de CCM que se establecieron como los más óptimos en cuestión de generación de energía el cual se utilizará para el desarrollo de un sistema de generación de energía a partir del modelo desarrollado aunado a esto se establecieron los parámetros biológicos primordiales para un desempeño óptimo en la generación de energía en una CMM, que se tomaron en cuenta para la búsqueda de sensores electrónicos para su monitorización con el fin de desarrollar un trabajo a futuro que estudie la relación de estos parámetros con los resultados obtenidos en la generación de energía.

En el cierre de este proyecto se puso en marcha el sistema de generación de energía que se desarrolló en un entorno cerrado a partir de cinco celdas de combustible microbianas del modelo híbrido que se planteó conectadas en paralelo a un tanque de suministro de sustrato. Los resultados obtenidos fueron contrastantes ya que obtuvieron Picos de voltaje de 765mV y voltajes mínimos de 31mV en las fases finales del ensayo.

Finalmente, con los resultados se llegaron a diversas conclusiones con las que se identificaron las áreas de oportunidad del modelo y el sistema desarrollado para su mejoramiento en un trabajo a futuro.

Abstract

Microbial Fuel Cells (MFCs) are electrochemical devices capacious of converting an organic-rich substrate into electricity. Their operation is based on the transfer of electrons during the respiration of bacteria housed in the cell's anode. In an oxygen-free environment, these bacteria transfer electrons to the cathode, which can either be located in a separate chamber connected by a proton exchange bridge or directly exposed to the outside of the cell.

The literature review on this work focused on analyzing previous microbial fuel cell designs to understand their operation, physical and biological characteristics, and limitations, as well as to present the benefits of their development and implementation.

Based on this research, a hybrid MFC model was proposed by combining two previous models that showed the best energy generation performance. This hybrid model was used to develop a power generation system. Additionally, the key biological parameters for optimal energy production were established. These parameters guided the selection of electronic sensors for monitoring, setting the stage for future work to study the relationship between these parameters and energy output.

In the final phase of this project, the power generation system was tested in a closed environment using five hybrid microbial fuel cells connected in parallel to a substrate supply tank. The results varied significantly, reaching peak voltages of 765 mV and dropping to minimum voltages of 31 mV during the final stages of the test.

Finally, the results led to several conclusions that identified areas of improvement for both the model and the system in future research.

Notación

- V : Voltaje
- I : Corriente eléctrica
- R : Resistencia eléctrica
- Ω : Ohms
- W : Watts
- J : Joule
- P : Potencia eléctrica
- P_d : Densidad de potencia
- EC : Eficiencia coulombica
- R_{int} : Resistencia interna
- V_{gen} : Voltaje generado
- mV : Milivolts
- mA : Miliampers
- mW : Miliwatts
- mW/m^2 : Miliwatts por metro cuadrado
- L : Litros
- Ph : Iones de hidrogeno H^+
- $^{\circ}C$: Grados centígrados
- $^{\circ}F$: Grados fahrenheit
- $\frac{W}{m^2}$: Watts por metro cuadrado
- CO_2 : Dioxido de carbono
- H_2O : Agua

Acrónimos

- **C.C.M.:** Celda de combustible microbiana
- **M.F.C.:** Microbial fuel cell
- **D.Q.O.:** Demanda química de oxígeno
- **D.B.O.:** Demanda biológica de Oxígeno
- **M.I.P.:** Membrana de intercambio protónico
- **P.E.M.:** Proton exchange membrane
- **M.I.C.:** Membrana de intercambio de cationes
- **M.I.A.:** Membrana de intercambio de aniones
- **O.R.R.:** Oxygen reaction reduction
- **R.R.O.:** Reacción de reducción de oxígeno
- **A.R.M.:** Aguas residuales municipales
- **S.E.M.A.R.N.A.T:** Secretaría de medio ambiente y recursos naturales
- **P.h.:** Potencial de hidrógeno
- **I.O.T.:** Internet of things
- **R.B.T.:** Reactor biológico tubular

Glosario

- Sistema: Colección de uno o más dispositivos, procesos o algoritmos implementados por computadora, que operan sobre una señal de entrada x para producir una señal de salida y .
- Celda: Espacio o receptáculo pequeño y cerrado.
- Combustible: cualquier material capaz de liberar energía cuando se cambia o transforma su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable (por ser una reacción química, se conoce como energía química).
- Metabolismo: Conjunto de reacciones químicas y procesos físicos que ocurren dentro de las células de un organismo.
- Potencial energético: Energía almacenada en un objeto o sistema debido a su posición, configuración o estado.
- Electrolito: Minerales con carga eléctrica (como sodio, potasio y magnesio) presentes en la sangre y líquidos corporales.
- Ánodo: Electrodo donde ocurre una reacción de oxidación.
- Cátodo: Terminal hacia el cual fluyen las cargas negativas o donde ocurre una reacción de reducción.
- Protones: Partículas subatómicas con carga eléctrica positiva que residen en el núcleo de todos los átomos.
- Electrodo: Conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.
- Bacteria: Un microorganismo unicelular procariota perteneciente al dominio Bacteria.
- Microbiano: Perteneciente o relativo a los microbios.
- Contaminante: cualquier sustancia, energía o agente físico, químico o biológico que se introduce en el medio ambiente.

- **Sustrato:** Sustancia o compuesto de interés que es modificado o alterado por un reactivo durante un proceso químico.
- **Hidrólisis:** Reacción química en la que una molécula de agua descompone a otro compuesto.
- **Fermentación:** Proceso natural y anaeróbico (sin oxígeno) en el que microorganismos como bacterias y levaduras descomponen azúcares y carbohidratos complejos en compuestos más simples.
- **Membrana:** Capa fina, flexible y semipermeable que actúa como barrera física separando dos medios.
- **Grafito:** Mineral suave, de color gris oscuro, que destaca por ser un excelente conductor eléctrico.
- **Potencia eléctrica:** Rapidez con la que un dispositivo o circuito transforma o consume energía.
- **Resistencia eléctrica:** Oposición u obstáculo que presenta un material al flujo de electrones.
- **Intensidad de corriente:** Cantidad de carga eléctrica que fluye a través de un conductor por unidad de tiempo.
- **Desempeño eléctrico:** Medición de la eficiencia y seguridad con la que un sistema, equipo o instalación utiliza, conduce o transforma la energía eléctrica.
- **Aerobio:** Todo organismo, proceso biológico o ambiente que requiere la presencia de oxígeno para subsistir o desarrollarse.
- **Anaerobio:** Término biológico que describe a los organismos, procesos o entornos que no requieren oxígeno para vivir o desarrollarse.
- **Reacción bioquímica:** Proceso químico que ocurre dentro de los organismos vivos y sustenta la vida.
- **Microcontrolador:** dispositivo electrónico que integra un procesador, memoria y periféricos de entrada/salida en un solo chip.

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	VI
Notacion	VIII
Acronimos	IX
Glosario	X
1 Introducción	2
1.1 Celdas de combustible	2
1.2 Breve descripción del estado del arte	3
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Solución propuesta	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos particulares	6
1.6 Hipótesis	7
2 Marco Teórico	8
2.1 Celda de Combustible	8
2.2 Configuración de una de una CMM	9
2.2.1 CCM de dos cámaras	9
2.2.2 CCM de una cámara	10
2.2.3 CCM de flujo continuo	10
2.2.4 Electrodo	11
2.2.5 Grafito, metales y métodos	13
2.2.6 Sistema de intercambio de protones	14
2.3 Combustibles empleados para la generación de energía	16
2.3.1 Tipo de combustible empleado en la CMM	16

2.3.2	Aguas residuales	17
2.3.3	Características físico-químicas de las Aguas Residuales	18
2.4	Generación de energía eléctrica en la CCM	21
2.4.1	Ley de Ohm	21
2.4.2	Potencia	21
2.4.3	Densidad de potencial	22
2.4.4	Eficiencia Coulómbica (EC)	23
2.4.5	Resistencia interna (Rint)	23
2.5	Parámetros de operación	24
2.5.1	Temperatura	24
2.5.2	Conductividad	24
2.5.3	Relación Alimento - Microorganismo	24
2.5.4	Curvas de Polarización (Cpol) y Curvas de potencia	25
2.5.5	Eficiencia y monitoreo	25
2.5.6	Desempeño eléctrico	25
2.5.7	Monitoreo de parámetros biológicos y generación de energía	26
3	Requerimientos, modelado y desarrollo del primer prototipo.	27
3.1	Requerimientos	27
3.2	Sensores y Microcontroladores	29
3.2.1	INA3221 Medidor de Voltaje y corriente	29
3.2.2	DHT11 Sensor de temperatura y humedad	30
3.2.3	PH-4502C Módulo de sensor de Ph y sonda Elect	30
3.2.4	Sensor de conductividad de agua EujgooV	31
3.2.5	Microcontrolados ESP32	32
3.3	Desarrollo del modelo experimental de la CCM	33
3.4	Modelo hibrido de CCM	33
3.4.1	Modelos esquemáticos de las CCMs	34
3.4.2	Modelo esquemático unificado	34
3.4.3	Escalamiento de un sistema en serie	35
3.5	Ensamble del sistema de Celdas de Combustible Microbianas	36
3.5.1	Materiales	36
3.5.2	Montaje de los componentes del sistema	39
3.6	Circuito electrónico	41
3.6.1	Diseño esquemático	41

3.6.2	Montaje en protoboard	42
3.7	Cronología de montaje del sistema de CCM	43
3.8	Cronología de adecuamiento del tanque de almacenamiento	44
3.9	Cronología del montaje del sistema completo	45
3.10	Obtención del sustrato	46
3.11	Inicio de proceso	47
4	Resultados	48
4.1	Resultados	48
4.1.1	Pruebas realizadas con el modelo diseñado	48
4.1.2	Operación y resultados de la CCM1	48
4.1.3	Operación y resultados de la CCM2	50
4.1.4	Operación y resultados de la CCM3	52
4.1.5	Operación y resultados de la CCM4	53
4.1.6	Operación y resultados de la CCM5	55
4.1.7	Comparación conjunta de resultados	57
5	Conclusiones y trabajo futuro	58
5.1	Áreas de oportunidad y trabajo a futuro	58
5.1.1	Puntos críticos de la composición de la CMM	58
5.1.2	Puntos críticos del sistema	59
5.1.3	Reestructuración de la composición de la CMM	59
5.1.4	Reestructuración del diseño del Sistema	60
5.2	Conclusiones	61
	Bibliografía	62

Índice de figuras

2.1	Esquema del modelo de cámaras separadas para una CCM. Se detalla el balance metabólico donde la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) es oxidada en el ánodo para producir CO_2 , iones de hidrógeno (H^+) y electrones (e^-), los cuales fluyen por el circuito externo para generar la corriente eléctrica.	8
2.2	Estructura de una celda de combustible microbiana de dos cámaras	10
2.3	Funcionamiento de una celda de combustible microbiana de una sola cámara con cátodo aireado de forma pasiva [25].	10
2.4	ConFiguración de una CCM de flujo continuo con arquitectura de dos cámaras.	11
2.5	Representación de los electrodos (Anódo y Cátodo) en una celda de combustible microbiana (CCM)	12
2.6	Grafito procesado en diferentes presentaciones	14
2.7	Imagen de escaneo electrónico de la biopelícula sobre el electrodo anódico de grafito: a) 270 aumentos y b) 2.700 aumentos [3].	14
2.8	Representación Gráfica del funcionamiento de una membrana de intercambio de protones	15
2.9	Representación gráfica de un Puente de intercambio protónico (PEM) [35].	15
2.10	Gráfico de captación y tratamiento de aguas residuales municipales [22]. .	17
2.11	Integración de La ley de ohm y la ley de potencia [40].	22
3.1	INA3221 Medidor de Voltaje y corriente.	29
3.2	DHT11 Sensor de temperatura y humedad.	30
3.3	PH-4502C Módulo de sensor de Ph y sonda Electroquímica.	31
3.4	Sensor de conductividad de agua EujgooV.	32
3.5	ESP32.	33
3.6	Modelos base utilizados para el diseño del prototipo híbrido.	34
3.7	Modelo híbrido de CCM. Diseño propio elaborado en biorender.com.	35

3.8	Modelado de un sistema en paralelo de flujo continuo de CCM. Diseño propio elaborado en biorender.com.	36
3.9	Tanque principal que alimenta las CCMs.	37
3.10	Recipientes que serán las cámaras de las CMMs.	37
3.11	Manguera para suministrar el sustrato.	37
3.12	Materiales para el ánodo.	38
3.13	Materiales para el cátodo.	38
3.14	Modificación a los recipientes utilizados.	39
3.15	Manguera modificada para suministrar las cinco cámaras.	40
3.16	Diagrama de flujo del desarrollo del circuito.	41
3.17	Diagrama esquemático del circuito electrónico.	42
3.18	Prueba de funcionamiento del circuito electrónico previo a su ensamblaje	42
3.19	Electrodos modificados	43
3.20	Membrana de transferencia Speek unida a la cámara ánidoca.	44
3.21	Desagüe de aguas residuales del cual se obtuvo la muestra para el desarrollo del ensayo.	46
3.22	Despliegue de datos obtenidos mediante las mediciones de los sensores.	47
4.1	Nivel no optimo de sustrato en la CCM1.	49
4.2	Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.	50
4.3	Fotografía de la condición de la CCM.	51
4.4	Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo	51
4.5	Fotografía de la condición de la CCM3.	52
4.6	Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.	53
4.7	Fotografía de la condición de la CCM	54
4.8	Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.	54
4.9	Fotografía de la condición de la CCM.	55
4.10	Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.	56
4.11	Gráfica comparativa de los resultados obtenidos de las cinco celdas.	57

Índice de tablas

2.1	Composición de aguas residuales	18
3.1	Parámetros de monitoreo, unidades y su importancia en el desempeño de la CCM.	28
3.2	Especificaciones de operación del monitor INA3221.	29
3.3	Especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad DHT11. . .	30
3.4	Detalles técnicos clave del sensor de pH PH4502C.	31
3.5	Ventajas de los modelos de CCM de una sola cámara y de flujo continuo. .	34
4.1	Resultados detallados de voltaje y densidad de potencia de las CCM híbridas.	57

Capítulo 1

Introducción

1.1. Celdas de combustible

Las celdas de combustible microbianas (CMMs) son, dispositivos bioelectroquímicos que convierten la energía química contenida en sustratos orgánicos en energía eléctrica mediante la actividad de microorganismos. El uso de material orgánico, como aguas residuales, en las CMMs las convierte en dispositivos ecológicos que ofrecen el doble beneficio de la generación de bioelectricidad y la gestión de residuos [28]. Estas dos grandes cualidades presentan a las CCMs como un alternativa sustentable para la eliminación de agentes contaminantes en cuerpos de agua así como para el tratamiento aguas residuales domésticas y industriales y en la generación de energía eléctrica.

1.2. Breve descripción del estado del arte

El concepto de Celdas de Combustible Microbianas ha sido desarrollado desde el siglo XVIII, donde la primera demostración del flujo de electrones en tejido biológico fue publicada en 1791 por el físico italiano Luigi Galvani. Poco más de un siglo después, en 1910, M. C. Potter publicó sus hallazgos sobre los efectos eléctricos involucrados en la fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* o *Escherichia coli*. En su estudio, Potter expresó la necesidad de comprender cómo se libera la energía, dado que los microorganismos consumen compuestos orgánicos como fuente de energía, y esta absorción debe, en consecuencia, conducir a una desorción, muy probablemente eléctrica. Demostró esto utilizando una celda galvánica con electrodos de platino. Su experimento tenía todas las características de un sistema bioeléctrico, lo que técnicamente lo convierte en la primera forma reportada de una celda de combustible microbiana. En 1931, Barnett Cohen retomó el montaje experimental de Potter para demostrar la capacidad de las reacciones biológicas de oxidación-reducción [15].

La redacción de esta tesis plasma la investigación a través de trabajos previos publicados entre 1990 hasta el presente año. Además de; su complementación con teoría eléctrica y química con el propósito de exponer modelos desarrollados previamente de celdas de combustible microbianas (CMM) y sus características físicas y químicas, con la principal meta de desarrollar un modelo híbrido basado en investigaciones y modelos existentes, con el fin de medir su eficiencia generando energía eléctrica en un sistema a escala de generación eléctrica aplicando el modelo desarrollado de CCM.

Este proyecto se realizó contemplando el contexto histórico y actual de la región del Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo el cual alberga El río tula, este cuerpo de agua es uno de los ríos más contaminados del país por lo cual es Uno de los epicentros de esta catástrofe medioambiental que recibe 150.000 litros de aguas residuales sin tratar cada segundo procedentes de Ciudad de México y el Valle de México. Las llamadas águas negras están repletas de residuos industriales y hospitalarios, y las aguas residuales de municipios colindantes que desbordan el río y sus afluentes [16]. Bajo este contexto se plantearon las CCMs como una alternativa a el tratamiento de aguas Residuales Municipales que de vierten en el río con el propósito de mitigar el impacto ambiental que provoca el desagüe de ARM sin tratar.

El trabajo redactada se centró en investigar diversos modelos y aplicaciones de CCMs con el propósito de analizar sus características específicas como: eficiencia eléctrica, menor resistencia interna, conductividad y despeno eléctrico. Consecuentemente se propusieron y evaluaron múltiples materiales y componentes para el desarrollo de cada sección del sistema con la finalidad de encontrar los materiales más adecuados para establecer una eficiencia más alta en nuestro sistema.

Posterior a la fundamentación teórica de esta tesis se desarrolló un prototipo de un sistema de generación eléctrico basado en el modelo desarrollado de CCM de una sola cámara de flujo continuo con base al análisis de materiales y condiciones que se deben cumplir para una ejecución óptima del modelo. La puesta en marcha del modelo propuesto concluyó en el monitoreo eficaz en los voltajes generados en cada una de las cámaras y gracias a la aplicación de la celda en un sistema de flujo constante se pudo obtener y mantener un voltaje máximo por un intervalo de tiempo mayor al de un sistema estacionario.

1.3. Planteamiento del problema

En la región Hidalguense del Valle del Mezquital precisamente en los doce municipios colindantes con el río Tula existe la problemática sobre el deficiente tratamiento en la descarga masiva de aguas residuales que se vierten día a día en el caudal del río este problema se dispara críticamente cuando se suman factores como la recepción del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, los desechos industriales de la Refinería Miguel Hidalgo, la planta termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y la industria química y cementera de la región aunado a esto la actividad agrícola de la región desemboca en el vertedero de fertilizantes pesticidas y herbicidas diluidos en el agua usada para el riego de cosechas. Todos los factores mencionados han generado una emergencia ambiental en la región ya que han generado una cadena de contaminación que se extiende por el suelo, el aire y llega hasta las cosechas que llegan hasta nuestras mesas afectando nuestra salud y nuestra calidad de vida.

En general, la infraestructura para tratar las aguas residuales en todo el estado de hidalgo es una deficiente red con contrastes la cual es encabezada por La Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) Atotonilco es un componente del proyecto Saneamiento para el Valle de México, diseñado principalmente para resolver los problemas de inundaciones que ocurren en la Ciudad de México y su Zona Metropolitana. Es considerada como la infraestructura de ingeniería hidráulica más grande que se haya construido en México y América Latina. El objetivo textual de la PTAR Atotonilco es evitar o reducir inundaciones mediante el saneamiento del 60 % de las aguas residuales generadas por la Zona Metropolitana del Valle de México y usarlas en el riego de más de 80 mil hectáreas de cultivo en el Valle de Tula, Hidalgo. [9] En contraste con el resto de la infraestructura existente en el estado de hidalgo ya que en el 2005 inició la implementación de plantas tratadoras de aguas residuales en el estado, de las cuales se reportaron a finales del 2023 362. Hoy, el 52 por ciento de ellas están abandonadas por falta de recursos económicos de los ayuntamientos y el resto opera con dificultades. [32]

La problemática se agrava cuando en el desglose de la capacidad de tratamiento de aguas residuales de Hidalgo es la más alta del país, únicamente por la presencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Atotonilco de Tula, misma que cuenta con la capacidad de sanear 35 mil litros por segundo; la entidad ocupa el lugar 30 a nivel nacional en el rubro de saneamiento de aguas residuales. Conagua reporta una media nacional del 68.1 por ciento, al 2025 16 entidades permanecen por debajo de esta medición para saneamiento de aguas residuales; Hidalgo ocupa la posición 30. [7]

La razón por la que se encuentran en abandono total o parcial es debido principalmente al abandono municipal y estatal ocasionado por los altos costos de electricidad para operarlas, la falta de presupuestal para su operación y mantenimiento. Esta situación es crucial debido a que por consecuencia no se pueda tener un tratamiento efectivo de ni siquiera el 50 % de las aguas residuales que se generan dentro del estado.

1.4. Solución propuesta

Como vimos anteriormente, la principal problemática por la cual las aguas residuales producidas por los municipios colindantes del río tula es la incapacidad a nivel estatal y municipal de operar y mantener en optimas condiciones las plantas tratadoras existentes en la región.

La solución presentada en este proyecto se centra en el involucramiento del campo de la electrónica en la investigación y desarrollo de tecnologías emergentes orientadas en el desarrollo sustentable y mitigación del impacto ambiental. Tecnólogas renovables como las Celdas de combustible microbianas aportan un valor agregado al tratamiento de aguas residuales el cual es la explotación de este modelo para la generación de energía eléctrica.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de sistema de celdas de combustible microbiana de flujo continuo con retroalimentación, capaz de mantener su voltaje máximo de manera estable y prolongada.

1.5.2. Objetivos particulares

- Analizar y evaluar el rendimiento de cada una de las celdas de combustible microbianas para determinar los factores sustanciales que pueden generar menor o mayor rendimiento.
- Calcular la eficiencia generada en todo el conjunto del sistema para demostrar su demostrar viabilidad

1.6. Hipótesis

Con el desarrollo de un modelo híbrido de celda de combustible microbiana se prevé que se pueda implementar en un sistema a escala en un ambiente controlado el cual se espera que cada celda que compone el sistema sea capaz de generar energía eléctrica a partir de aguas residuales.

La meta principal con el desarrollo y aplicación del modelo de CCM y de este prototipo es explorar y experimentar con tecnologías emergentes capaces de mitigar el impacto ambiental causado a cuerpos de agua con el propósito de aportar a la mitigación del deterioro ambiental y crear una vía de desarrollo con características sustentables.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Celda de Combustible

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) son dispositivos electroquímicos que utilizan microorganismos para la producción de bioelectricidad de manera sustentable [12]. El principio de funcionamiento de este sistema consiste en utilizar la actividad metabólica de las bacterias para degradar materia orgánica con alto potencial energético. La energía liberada en forma de electrones es captada por un ánodo y un cátodo interconectado, el flujo de electrones a través de estos materiales generando una corriente eléctrica. [11] como se representa en la Figura 2.1

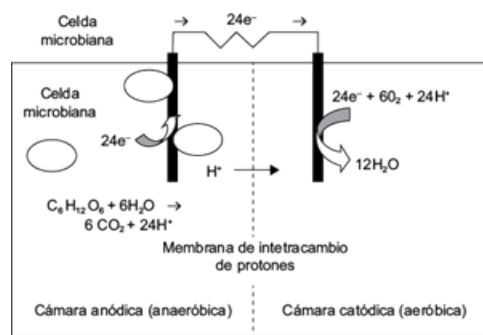


Figura 2.1: Esquema del modelo de cámaras separadas para una CCM. Se detalla el balance metabólico donde la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) es oxidada en el ánodo para producir CO_2 , iones de hidrógeno (H^+) y electrones (e^-), los cuales fluyen por el circuito externo para generar la corriente eléctrica.

Estas celdas se diferencian con otros sistemas gracias a que estos dispositivos se logran mantener en condiciones independientes y no requieren de muchos procesos para lograr una generación de energía, esto quiere decir que se pueden instalar en cualquier parte ya que operan eficientemente a temperatura ambiente incluso a bajas temperaturas [13]. Además surgen como una alternativa destacada en comparación de las energías renovables ya consolidadas debido su capacidad de generar energía utilizando aguas residuales como combustible y simultáneamente es posible eliminar la materia orgánica presente en dicho combustible generando un valor agregado y una ventana de oportunidad para desarrollar una industria eléctrica sostenible que ayude a mitigar y revertir el impacto del ser humano en cuerpos de agua contaminados por aguas residuales.

2.2. Configuración de una de una CMM

Las celdas de combustible microbiana tienen variantes en su configuración cada una con distinciones marcadas tanto en su composición como en su rendimiento, existen dos variantes en configuraciones que han sido más estudiadas y que cuentan con rendimiento comprobado.

2.2.1. CCM de dos cámaras

La celda de dos cámaras es el tipo más común, donde el combustible se oxida en la superficie del ánodo, ubicada en la cámara del anolito. El electrolito conductor de iones transporta las especies oxidadas al cátodo, donde tiene lugar la reacción de reducción de oxígeno (ORR). La reacción de reducción ocurre en la superficie del cátodo, ubicada en la cámara del catolito. Una membrana de intercambio catiónico separa el anolito del catolito. La principal diferencia entre una celda de combustible química y una MFC es el ánodo, que contiene una biopelícula con bacterias electroactivas o una proteína [38]. La Figura 2.2 es una representación de la estructura de una celda de combustible microbiano:

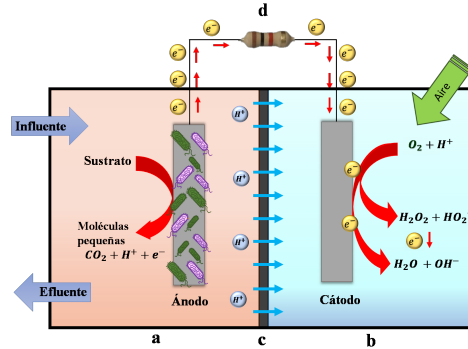


Figura 2.2: Estructura de una celda de combustible microbiana de dos cámaras

2.2.2. CCM de una cámara

Las CCM de una cámara mostrada en Figura 2.3 están estructuradas por un solo compartimento en donde se colocan el ánodo y cátodo, los cuales se encuentran generalmente separados por una membrana de intercambio de protones [4]. Esta configuración al contar con un diseño simplificado es más compacto y al eliminar el MIP consigue tener menor resistencia interna.

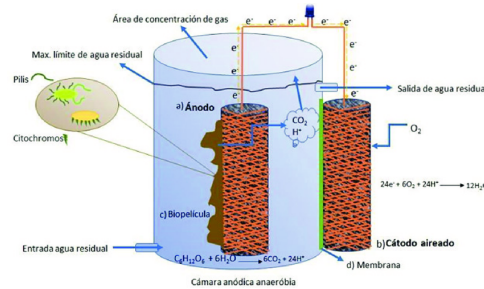


Figura 2.3: Funcionamiento de una celda de combustible microbiana de una sola cámara con cátodo aireado de forma pasiva [25].

2.2.3. CCM de flujo continuo

El tercer modelo de estudio en este trabajo es la CCM de flujo continuo mostrada en Figura 2.4 que a diferencia de los sistemas antes mencionados donde las cámaras almacenan el combustible hasta que la reacción termine. El sistema por lotes presenta varias desventajas, como el agotamiento del sustrato debido a la limitación de nutrientes y la toxicidad de los subproductos. Además, las MFC por lotes no son adecuadas para aplicaciones como la producción de energía y el tratamiento de aguas residuales [30].

Los sistemas de flujo continuo ofrecen varias ventajas, entre ellas: (1) la composición del medio se puede optimizar para lograr la máxima productividad, (2) la producción de metabolitos secundarios también se puede controlar, (3) la cinética de crecimiento y las constantes cinéticas se determinan con precisión, (4) el proceso genera resultados reproducibles y datos fiables, (5) se alcanza una alta productividad por unidad de volumen y (6) el cultivo continuo requiere menos mano de obra [30].

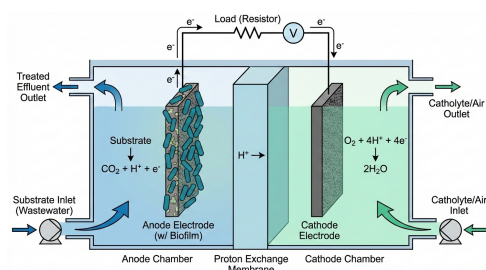


Figura 2.4: Configuración de una CCM de flujo continuo con arquitectura de dos cámaras.

2.2.4. Electrodos

Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo, un semiconductor, un electrolito, un gas, entre otros. [10] En sistemas donde los microorganismos catalizan la conversión de energía química a eléctrica los electrodos funcionan como aceptores o donadores de electrones sólidos [19]. El material debe permitir que las bacterias formen biopelículas y debe ser de un material conductivo no corrosivo, pueden ser de materiales orgánicos metálicos o de carbono [13]. Las modificaciones de electrodos son clave para el aumento del rendimiento de la CCM los materiales necesarios para llevar a cabo el proceso electroquímico deben poseer ciertas características; buenas conductividad eléctrica, estabilidad química y mecánica, el uso de electrodos de grafito cumple con estos requisitos, además se encuentra disponible en múltiples presentaciones como las placas, (superficie bidimensional), o gránulos, fieltro papel, espuma, fibras (superficies bidimensionales), entre otras [3]. La Figura 2.5 es una representación gráfica de los electrodos que se encuentran en una CCM de dos cámaras

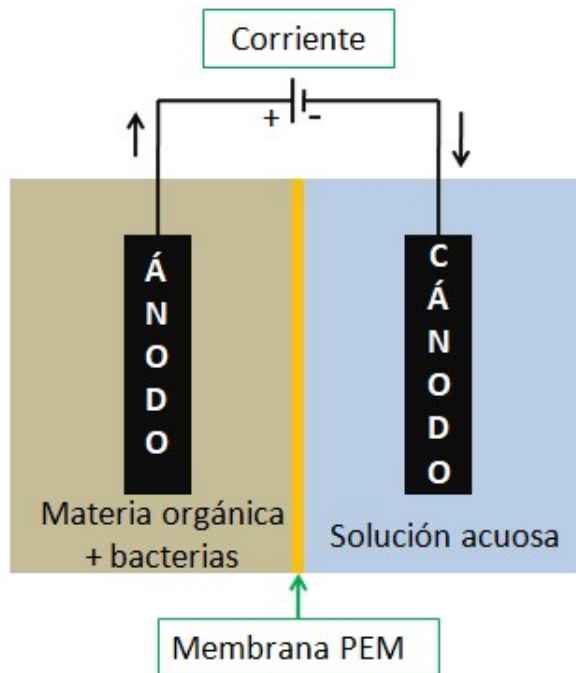


Figura 2.5: Representación de los electrodos (Ánodo y Cátodo) en una celda de combustible microbiana (CCM)

Ánodo

El ánodo es uno de los componentes esenciales de las CCMs, junto con el cátodo y el electrolito, es aquí donde las bacterias catalizan la oxidación del sustrato y liberan electrones como resultado de su respiración [13].

La selección del material del ánodo es un factor muy importante debido que influye significativamente en la formación de la biopelícula, la transferencia de electrones entre el microorganismo y el aceptor de electrones, se pueden implementar diversos materiales como metales diversos tipos de carbono. Entre los materiales más empleados como ánodo en las CCMs a escala de laboratorio se encuentran los de metal y carbón que varían enormemente en la configuración y área superficial [20].

Se han desarrollado varios métodos de modificación del ánodo que facilitan la adhesión de las bacterias y la transferencia electrónica como son; Tratamiento de la superficie con métodos físicos o químicos, recubrimiento con materiales altamente conductores y finalmente el uso de electrodos compuestos (metal- grafito) [36].

Cátodo

En las CCMs, el oxígeno se reduce en la interfaz trifásica de aire (gas), electrolito (líquido) y electrodo (sólido) para formar agua (vía de cuatro electrones) o peróxido de hidrógeno (vía de dos electrones) [27]. Un cátodo típico de CCMs consta de tres capas: capa de difusión (DL), material de soporte conductor y catalizador [27].

La elección del diseño y material del cátodo es uno de los aspectos más críticos del desarrollo de este tipo de sistemas ya que es uno de los factores más limitantes del rendimiento de las CCMs en términos de producción de corriente. El cátodo debe tener un alto potencial redox y una facilidad para capturar electrones. [36]

El catalizador más popular es el platino, el cual triplica la densidad de corriente sobre un soporte de material carbonoso puro. Sin embargo, el platino es muy caro y escaso lo que limita su aplicación práctica. Debido a que el catalizador eleva mucho el coste del cátodo y por lo tanto del sistema, se ha evaluado la posibilidad de emplear materiales carbonosos de gran área específica que reduzcan el sobrepotencial de la reacción catódica evitando el uso de un catalizador metálico [36].

Una opción viable para aumentar la capacidad reductora del oxígeno de los materiales carbonosos es modificar el cátodo ya sea sometiénndose a un tratamiento físico o químico. [8] Para reducir el coste de estos sistemas se está extendiendo el uso de biocátodos que además de ser más económicos presentan una gran estabilidad, se suelen fabricar con materiales carbonosos, similares a los utilizados en el cátodo [36].

2.2.5. Grafito, metales y métodos

Como se ha hecho énfasis en los puntos anteriores el grafito apunta para ser el material idóneo para montar los cátodos en nuestra CCM ya que diversas pruebas y estudios han demostrado que el uso de tela de carbón, grafito, grafito tejido, cepillos entre otros materiales a base de grafito representados en la Figura 2.6 contienen propiedades conductoras y físicas idóneas para el establecimiento de las colonias bacterianas.

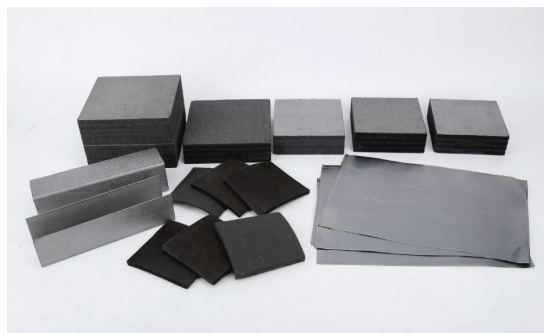


Figura 2.6: Grafito procesado en diferentes presentaciones

Las Figuras 2.7 presentan como la estructura física del grafito es un entorno idóneo para las colonias bacterianas alojadas en el ánodo.

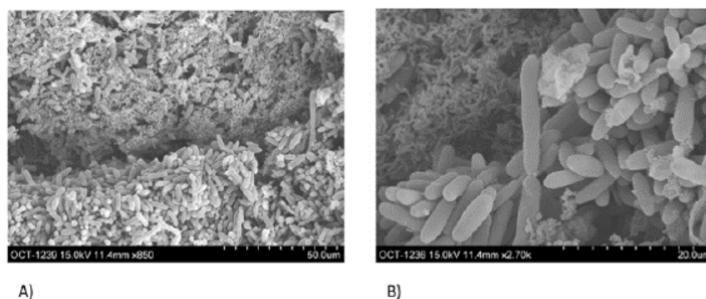


Figura 2.7: Imagen de escaneo electrónico de la biopelícula sobre el electrodo anódico de grafito: a) 270 aumentos y b) 2.700 aumentos [3].

2.2.6. Sistema de intercambio de protones

1.2.6.1 Membrana de intercambio de protones

Un sistema de intercambio de protones es aquel que impide el paso de electrones (e^-) de la cámara anódica a la catódica y permite el transporte selectivo de protones (H^+) como se representa en la Figura 2.8. Este componente puede ser de varios tipos, destacando la membrana de intercambio de cationes (MIC), la membrana de intercambio de aniones (MIA), la membrana bipolar, membranas de microfiltración y ultrafiltración, así como el puente salino, fibra de vidrio, membranas porosas y otros materiales para filtrado [13].

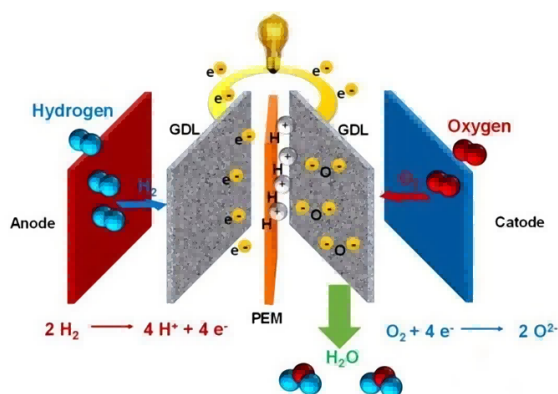


Figura 2.8: Representación Gráfica del funcionamiento de una membrana de intercambio de protones

1.2.6.2 Puente de intercambio

En las CCM de doble cámara, el ánodo y el cátodo se ubican en dos compartimentos distintos como representad en la Figura 2.9, los cuales están separados por una membrana de intercambio de protones o por un puente de sal. Lo anterior tiene como fin permitir que los protones (H^+) se desplacen hacia el cátodo, mientras se bloquea la difusión de oxígeno hacia el ánodo [31]. Por otro lado, la CCM de cámara única consta de una sola cámara anódica que contiene tanto el ánodo como el cátodo; este último, generalmente, se encuentra expuesto directamente al aire [42].

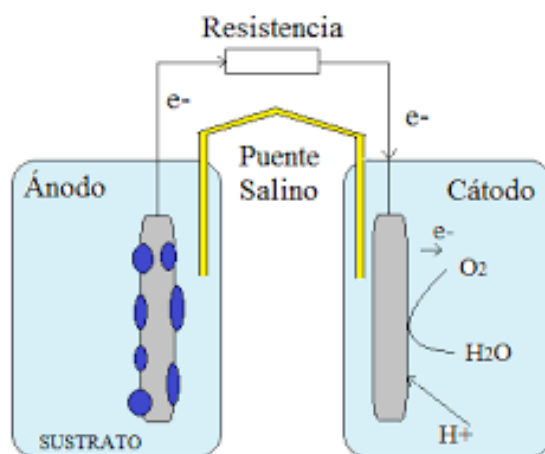


Figura 2.9: Representación gráfica de un Puente de intercambio protónico (PEM) [35].

2.3. Combustibles empleados para la generación de energía

2.3.1. Tipo de combustible empleado en la CMM

Una celda de combustible microbiano convierte un sustrato biodegradable directamente en electricidad [13]. El sustrato en una celda de combustible microbiana es, esencialmente el combustible o la fuente de alimento de la cual los microorganismos parten para producir energía eléctrica, por lo cual es de gran importancia para el desarrollo de los procesos biológicos dentro del ambiente de las CCMs. El sustrato es un compuesto que, dependiendo de su origen varía su composición y carga química ya sea un sustrato combinado o puro. Gran variedad de sustratos puede emplearse como; compuestos puros, sustratos simples, complejos de acuerdo con la procedencia de las aguas residuales [34]. Los sustratos simples son compuestos químicos definidos que los microorganismos pueden oxidar fácilmente o que son productos en fase de descomposición los cuales a menudo son empleados en estudios fundamentales o de laboratorio [17].

A diferencia de un sustrato simple, los sustratos complejos están compuestos de forma variada por compuestos orgánicos, generalmente residuos orgánicos o biomasa, de los cuales su característica principal para tomar en cuenta es que requieren una degradación previa a partir de hidrólisis y/o fermentación por parte de un consorcio microbiano para liberar los compuestos simples.

Dependiendo del tipo de sustrato a elegir así como la concentración y calidad de este se determinará el rendimiento de la CCM. La potencia y el voltaje máximo dependerán del aporte química que el sustrato entregue, esto se debe a que el sustrato libera una cantidad fija de energía.

Es importante destacar que la concentración del sustrato afecta directamente al rendimiento de la CCM; cuando el sustrato es escaso en la cámara anódica se limita la generación de energía eléctrica debido a que las bacterias carecen de materia para descomponer. En cambio, cuando la concentración llega a niveles de saturación (punto límite), la generación de energía eléctrica alcanza un máximo (V_{max}) cuando la biopelícula se encuentra saturada. En otro punto, cuando el sustrato se encuentra en concentraciones excesivamente altas, algunos sustratos o sus productos de degradación pueden volverse tóxicos o inhibidores para las bacterias, causando contaminación de la cámara y la caída del rendimiento.

La orina es una excelente materia prima para sistemas de CCM en aplicaciones reales. Además del tratamiento de orina con CCM, los resultados de estudios recientes son prometedores para la recuperación directa de bioelectricidad de la orina. Un sistema de CCM

inoculado con lodos activados y alimentado con orina humana se ha aplicado prácticamente en sistemas de iluminación. También se ha informado que la orina potencia una CCM con mayor eficacia cuando se agotan sus propiedades ricas en nutrientes [39].

2.3.2. Aguas residuales

Se define como aguas residual a las aguas de composición variada que proviene de usos municipales, industriales, comerciales agrícolas, pecuarias o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada y que por tal motivo haya sufrido degradación en su calidad original [6].

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable de las actividades humanas. Por lo que representa un hecho el vertido de aguas residuales sin depurar, ocasionando contaminación en la tierra, en ocasiones irreversibles, afectando tanto ecosistemas acuáticos y el vertido de aguas residuales no tratadas supone riesgos para la salud pública [13]. Durante la gestión de aguas residuales, pueden generarse emisiones de gases de efecto invernadero tanto por su eliminación o vertido a un cuerpo de agua así como por la generación de sus lodos subproductos del mismo tratamiento [22].

Según datos reportados en el año 2016 se generaron a nivel nacional más de 7,200 millones de m^3 de ARM ($228.940 m^3/s$), de los cuales el 92.70 % fueron captadas ($212.204 m^3/s$). Del volumen de ARM colectadas, un 58.20 % recibieron tratamiento ($123.587 m^3/s$), mientras que el 41.80 % de caudal colectado restante fue vertido sin previo tratamiento ($88.617 m^3/s$) [22], los datos anteriores son representados en la Figura 2.10.

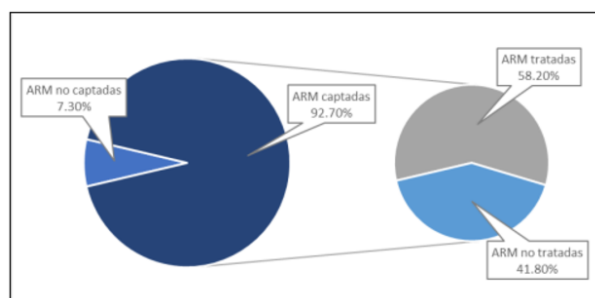


Figura 2.10: Gráfico de captación y tratamiento de aguas residuales municipales [22].

2.3.3. Características físico-químicas de las Aguas Residuales

El conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es esencial para el proyecto y funcionamiento de instalaciones de tratamiento; la composición del agua residual se refiere a los constituyentes físicas, químicos y biológicos que alteran el estado natural del agua al contaminarse con diferentes agentes químicos. El desglose las propiedades físicas y químicas se puede ver plasmado en la tabla 2.10 la cual detalla medidas medias, minimas y maximas en las que se componen el sustrato analizado.

Tabla 2.1: Composición de aguas residuales

Parámetro	Media	Mínimo	Máximo
Caudal (L/s)	174.57	67.40	287.80
Temperatura (°C)	15.02	14.50	15.50
pH	8.44	8.05	8.77
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	532.94	265.00	788.00
DQO ($\text{mg } O_2/\text{L}$)	582.60	120.00	1180.00
DBO ₅ ($\text{mg } O_2/\text{L}$)	300.37	45.00	490.00
Sólidos sedimentables (mL/L)	6.98	0	21.00
Sólidos suspendidos (mg/L)	223.14	16.00	494.00
Alcalinidad			
Hidróxidos (mg/L)	0	0	0
Carbonatos (mg/L)	8.61	0	30.00
Bicarbonatos (mg/L)	290.68	225.70	396.50
Turbidez (NTU)	146.68	24.00	357.65
Cloruros (mg/L)	49.70	20.50	100.00
Sulfatos (mg/L)	99.11	20.00	202.67
Nitratos (mg/L)	3.27	0.15	5.71
Nitritos (mg/L)	0.31	0.07	0.58
Fosfatos (mg/L)	19.92	7.97	31.87
Amonio (mg/L)	65.39	20.00	111.25
Dureza ($\text{mg } CO_3Ca/\text{L}$)	146.11	90.90	195.36
Calcio (mg/L)	36.74	25.63	46.28
Magnesio (mg/L)	12.41	4.42	19.39

Características físicas

La característica fundamental de las ARM es su contenido total en sólidos, los cuales están conformados por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Los sólidos totales proceden principalmente del agua de abastecimiento, del uso industrial y del uso doméstico [41].

El aumento en la velocidad de las reacciones bioquímicas, como consecuencia de incrementos en la temperatura de las aguas superficiales, puede ocasionar una drástica disminución en la concentración del oxígeno disuelto durante los meses de verano [37].

La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana está en el rango de 77 a 95°F (de 25 a 35°C). Los procesos de digestión aerobia y nitrificación se detienen cuando la temperatura alcanza valores de 122°F (50°C). Cuando la temperatura se acerca a los 15°C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad. [37]

El color es un indicativo en la edad de las aguas residuales [13], ya que el agua residual suele ser gris, sin embargo conforme la materia orgánica es descompuesta por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua se reduce a cero y las ARM se van tornando negras. En esta condición la denominación cambia a Agua residual séptica. Los olores emanados de las ARM en cualquiera de sus ciclos son producidos por gases presentes durante la descomposición de los residuos orgánicos presentes en las ARM. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, el olor característico del agua residual séptica es el del sulfuro de hidrógeno producido por microorganismos anaerobios que reducen sulfatos a sulfitos. [23]

Características químicas

En un agua residual de intensidad media, un 75 % de sólidos suspendidos y un 40 % de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. [21] Las aguas residuales también pueden estar formadas por pequeñas cantidades de una variedad de moléculas orgánicas sintéticas cuya estructura puede ser muy simple o llegar a tener una estructura compleja como agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas.

Los principales grupos de sustancias orgánicas halladas en el agua residual son las proteínas (40 % a 60 %), carbohidratos (25 % a 50 %) y grasas y aceites (10 %). La urea, principal constituyente de la orina, es otro compuesto orgánico del agua residual.

La demanda Química de Oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar el total de la materia orgánica presente en una muestra de agua residual hasta

dar bióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) como productos finales bajo condiciones controladas. El método DQO es una medida indirecta que se usa a menudo para medir contaminantes en el agua para evaluar la fuerza de los desechos tales como aguas residuales municipales e industriales [5].

La demanda Bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación por vía biológica de la materia orgánica biodegradable presente en dicha agua residual. La importancia de las pruebas de DBO radica en que permiten calcular o predecir, cuando menos aproximadamente, el efecto que causaría una determinada descarga de aguas residuales sobre la concentración de oxígeno disuelto de un cuerpo de aguas receptor [5].

El pH es la concentración de ion hidrógeno; es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo bacteriano es fundamental; concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presentan dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar el pH en las aguas naturales si ésta no se ajusta antes de la evacuación de las aguas [23].

Características biológicas

Las características biológicas abarcan los organismos que más presencia tienen en las ARM: las bacterias, las cuales, dependiendo de su clasificación, ejercen un papel fundamental en el funcionamiento de las CCMs. En el tratamiento biológico de las aguas residuales, las bacterias heterótrofas constituyen el grupo más importante por su necesidad de compuestos orgánicos para el carbono celular [13]. El pH del ambiente también es un factor clave en el crecimiento de los organismos. La mayoría de las bacterias no toleran niveles de pH superiores a 9,5 ni inferiores a 4,0. Generalmente, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se encuentra entre 6,5 y 7,5 [24].

2.4. Generación de energía eléctrica en la CCM

2.4.1. Ley de Ohm

En el cálculo de rendimiento del sistema de las CCMs, la ley de Ohm es la principal herramienta matemática aplicada en el cálculo de eficiencia en las CCMs, ya que nos permite obtener el rendimiento a partir de las mediciones básicas como la diferencia de potencial (V), corriente eléctrica (I) y resistencia eléctrica (R).

La ley de Ohm establece que la intensidad de la corriente eléctrica (I) que circula por un circuito eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial (V) que aplicamos entre los extremos del circuito eléctrico, y es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (R) del conductor.

La relación matemática se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

donde I es la corriente en amperios (A), V es el voltaje en volts (V) y R es la resistencia en ohms (Ω).

2.4.2. Potencia

La potencia eléctrica es la rapidez con la que un circuito eléctrico consume o produce energía; su unidad de medida se expresa en Watts (W), que equivale a un Joule (J) por segundo. La potencia eléctrica (P) es el producto del voltaje (V) multiplicado por la corriente eléctrica (I).

Matemáticamente, la potencia se define como:

$$P = V \cdot I \quad (2.2)$$

Sustituyendo la ley de Ohm ($V = I \cdot R$), también podemos expresarla en función de la resistencia:

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.3)$$

Uniando Ley de OHM y la ley de Potencia obtenemos todas las variantes resumidas en la Figura 2.11:

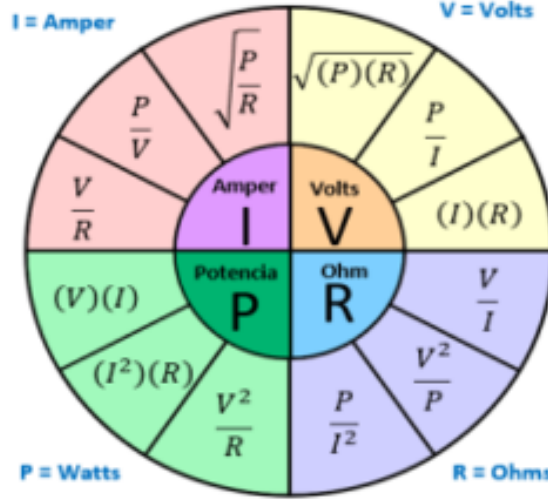


Figura 2.11: Integración de La ley de ohm y la ley de potencia [40].

El desempeño eléctrico dentro de las CCMs se estudia partiendo de las mediciones de voltaje realizadas a cada CCM; se puede evaluar el comportamiento eléctrico de estos dispositivos a través de los parámetros que se analizan, tales como la densidad de potencia (DP), la eficiencia coulombica (EC) y la resistencia interna (R_i) [13].

2.4.3. Densidad de potencial

Respecto al desempeño de la CCM, un parámetro ampliamente utilizado ha sido el cálculo de la Densidad de Potencia, la cual es la potencia normalizada de acuerdo al área del ánodo [2]. Se define por unidad de área de W/m^2 o watts por metro cuadrado; esto sirve para determinar cuánta energía se puede producir en un volumen de agua predeterminado. La densidad de potencia se expresa como el cuadrado del voltaje generado (V_{Gen}) dividido entre el producto de la resistencia (R) por el área (A):

$$DP(mW/)^2 = \frac{(V_{Gen})^2}{R \cdot A} \quad (2.4)$$

2.4.4. Eficiencia Coulómbica (EC)

La eficiencia de corriente se determinó con base a la eficiencia coulómbica (EC), la cual se define como la cantidad de materia orgánica que se recupera como electricidad.

$$Ec = \frac{C_p}{C_{ti}} * 100 \% \quad (2.5)$$

Para determinar C_p se utiliza la gráfica de la corriente en función del tiempo de operación de la CCM.

Al integrar el área bajo la curva desde ($t = 0$ hasta 130 días) se obtiene la carga total (q) en coulombs. Para el cálculo de la cantidad teórica de coulombs que pueden ser producidos por la glucosa se emplea la ecuación anteriormente descrita para C_{ti} [1].

$$C_{ti} = \left[\frac{F \times b \times S \times v}{M} \right] \quad (2.6)$$

Donde F es la constante de Faraday ($96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ de electrones), b es el número de moles de electrones producidos por mol de sustrato (para glucosa como sustrato $b = 24$), S es la concentración del sustrato ($g \cdot l^{-1}$), v es el volumen del líquido, y M es el peso molecular del sustrato (glucosa, 180). De esa manera se obtiene $C_{ti} = 20681,85$.

La eficiencia coulómbica en un electrodo acuoso se puede mejorar empleando para el circuito una menor resistencia [1].

2.4.5. Resistencia interna (R_{int})

Este parámetro es importante conocerlo, pues al determinar la resistencia interna se puede encontrar la corriente eléctrica generada por la celda, puesto que los valores de corriente determinados en las mediciones son dependientes de la resistencia externa utilizada; es decir, este valor de corriente corresponde a la corriente consumida por el sistema mas no a la generada [42].

Hay diferentes métodos para evaluar la resistencia interna (R_{int}) de una CCM. Estos incluyen: curva de polarización, picos de densidad de potencia, espectroscopia electroquímica y métodos de interrupción de corriente. Los dos primeros son los más sencillos y proveen un estimado rápido de la resistencia interna; sin embargo, se prefieren los dos últimos, aunque requieren del uso de un potenciostato [20].

2.5. Parámetros de operación

2.5.1. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en digestión anaerobia, estando la producción de metano durante la misma estrechamente relacionada con este parámetro operacional [18]. Las reacciones microbianas pueden ser llevadas a cabo en diferentes rangos de temperatura dependiendo de la tolerancia de las bacterias, variando desde temperaturas ambiente ($15 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) a altas temperaturas ($50 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) toleradas por los microorganismos termófilos, hasta bajas temperaturas ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) donde prosperan los microorganismos psicrófilos [14].

Tanto para las MFCs de cámara doble como para las de cámara única, el rendimiento en términos de eliminación de DQO y en términos de generación de energía eléctrica mejora con el aumento de temperatura. Además, el rendimiento de las pilas de cámara única sobrepasó al de las pilas de cámara doble en todas las variables consideradas a cada temperatura, mostrando una clara influencia de la configuración del reactor en los resultados obtenidos [18].

2.5.2. Conductividad

Mantener una condición de pH adecuada del electrolito es necesario para obtener una alta densidad de potencia y corriente eléctrica en MFC [26]. En muchas CCMs, la resistencia óhmica del electrolito representa un gran porcentaje de la resistencia interna total. Al incrementar la conductividad del electrolito, decrece esta resistencia iónica, y se ha demostrado que la densidad de potencia responde positivamente incrementándose al, por ejemplo, agregar 300 mM de NaCl a la solución anódica [20].

Los cationes como Na^+ y K^+ , distintos de H^+ , son propensos a transferirse hacia el cátodo; sin embargo, el transporte de masa de H^+ es lento, por lo que su acumulación en el ánodo causa la acidificación del anolito y restringe significativamente la generación de electricidad en los MFC [26].

2.5.3. Relación Alimento - Microorganismo

La energía que se puede generar en una pila de combustible microbiana depende tanto de procesos biológicos como electroquímicos. [29].

2.5.4. Curvas de Polarización (Cpol) y Curvas de potencia

Las curvas de polarización y densidad de potencia reflejan directamente el rendimiento de las celdas de combustible microbianas (CCM). Son los métodos más comunes para determinar las pérdidas internas y la potencia máxima alcanzable de las MFC [39].

Las curvas de polarización se refieren a las pérdidas que normalmente se producen en las celdas de combustible y generalmente se describen mediante tres secciones de declive:

- **Primera sección:** Con una caída de tensión rápida.
- **Segunda sección:** Con una caída de tensión lineal.
- **Tercera sección:** Con una caída de tensión rápida, en la que la densidad de corriente es máxima.

Estas tres regiones de declive se atribuyen a menudo a la pérdida de activación, óhmica y de concentración (o transferencia de masa). Estas pérdidas suelen evaluarse desde diferentes regiones de las curvas según sus formas [39]. Una curva de potencia describe la potencia (o la densidad de potencia) en función de la corriente (o la densidad de corriente) y es calculada a partir de la curva de polarización [20].

2.5.5. Eficiencia y monitoreo

Las CCM pueden ser monitoreadas a través de parámetros electroquímicos tales como densidad de potencia, corriente eléctrica generada y voltaje. De igual forma, un parámetro biológico muy importante es la carga orgánica del sustrato a emplear, expresada en $kg \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ [1].

2.5.6. Desempeño eléctrico

En general, los factores que influyen significativamente en el rendimiento de generación de energía de las MFC se pueden dividir en tres categorías: condiciones de reacción, propiedades del sustrato y configuraciones del dispositivo [43].

- **Condiciones de reacción:** El rendimiento de generación de energía de las MFC también se ve influenciado por las condiciones de reacción, incluyendo la temperatura ambiente, el oxígeno disuelto, el tiempo de retención hidráulica y el pH [43].

- **Propiedades del sustrato:** Las características del sustrato, especialmente las especies y la actividad de los microbios en él, desempeñan un papel importante en el rendimiento de la producción de electricidad de las MFC, que dependen principalmente de procesos metabólicos microbianos para convertir la energía química en energía eléctrica [43].
- **ConFiguraciones del dispositivo MFC:** El volumen de la cámara de reacción de la mayoría de las MFC varía de 0 a 50 L, y la densidad de corriente puede disminuir al aumentar dicho volumen [2]. La corriente, el voltaje y la eficiencia coulombica de las MFC también pueden verse directamente afectados por las características de los materiales de los electrodos [43].

2.5.7. Monitoreo de parámetros biológicos y generación de energía

Un sistema de monitoreo y evaluación correctamente diseñado es fundamental para el eficiente y continuo funcionamiento de un sistema autónomo, como lo es el sistema de tratamiento de agua basado en un RBT. Hasta el día de hoy, para lograr el objetivo de monitorear este sistema, se deben tomar muestras semanales de manera manual viajando hasta la localización del reactor; una vez en el sitio, se realiza el muestreo de las diversas variables, ya sea con algún instrumento portátil o, en el peor de los casos, transportando las muestras a un laboratorio donde puedan analizarse para así definir qué tan eficiente está siendo el RBT [33].

Para el monitoreo de las CCM a escala se utilizan múltiples equipos de medición de laboratorio como el voltímetro, amperímetro, termómetro y el medidor de pH. A pesar de proveer de una medición exacta, las dimensiones y operación de estos equipos no hacen posible su integración y monitoreo en tiempo real de la CCM. Por lo cual, la integración de sistemas electrónicos como tarjetas de desarrollo y sistemas automáticos de medición, junto con tecnologías de IoT (*Internet of Things*), permite que el monitoreo en tiempo real nos brinde un mayor control en los parámetros biológicos de la celda y de su producción de energía.

Capítulo 3

Requerimientos, modelado y desarrollo del primer prototipo.

3.1. Requerimientos

Tras plantear nuestros objetivos en el proyecto y la revisión del marco teórico, se definieron los parámetros críticos para mantener una población bacteriana saludable y optimizar la eficiencia energética de la celda, se inició el análisis y desarrollo tanto del sistema generador de energía así como el modelado del dispositivo de CCM del caul estará basado. También búsqueda y selección de microcontroladores y componentes electrónicos capaces de procesar los datos suministrados por los sensores. En la Tabla [3.1](#) se describen, de manera detallada, cada uno de los parámetros que se deben analizar para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 3.1: Parámetros de monitoreo, unidades y su importancia en el desempeño de la CCM.

Parámetro	Unidad de valor	Importancia
Voltaje generado	Volt (V)	El monitoreo del voltaje producido por una CCM es de suma importancia debido a que es el principal indicador de la salud de la colonia y eficacia del sistema.
Corriente	Amper (A)	El seguimiento de la corriente es fundamental para evaluar las condiciones de la operación, como lo son la generación de energía eléctrica y un tratamiento eficaz de aguas residuales.
pH	Iones de hidrógeno (H^+)	El nivel de acidez en la cámara anódica es de suma importancia en el seguimiento de una CCM ya que determina el crecimiento microbiano dentro de la celda.
Oxígeno disuelto	(mg/L)	El análisis del nivel de oxígeno disuelto permite mantener las condiciones anaeróbicas requeridas por el ánodo para una producción eficiente de energía.
Temperatura	Centígrados ($^{\circ}C$)	Los microorganismos operan dentro de un rango de temperatura específico con un punto óptimo para la actividad enzimática y el metabolismo; temperaturas fuera de este rango ralentizan o estropean la producción.
Humedad	Gramos por metro cúbico (g/m^3)	El monitoreo constante de la humedad es primordial para prevenir deshidratación o una saturación excesiva de la membrana, lo que ayuda a evitar un mantenimiento correctivo.
Conductividad eléctrica	Siemens por metro (S/m)	La densidad de potencia depende de la resistencia óhmica. Al aumentar la conductividad del electrolito, la resistencia óhmica baja, haciendo que la generación de energía aumente y sea más estable.

3.2. Sensores y Microcontroladores

3.2.1. INA3221 Medidor de Voltaje y corriente

El INA3221 (Figura 3.1) es un monitor de voltaje de bus y de corriente de lado alto (*high-side*) de tres canales con una interfaz I^2C . Este dispositivo monitorea tanto las caídas de voltaje en la resistencia de derivación (*shunt*) como los voltajes de suministro del bus, contando además con tiempos de conversión y modos de promedio programables para estas señales. El INA3221 ofrece alertas tanto críticas como de advertencia para detectar múltiples condiciones fuera de rango programables en cada canal. Para el seguimiento de los voltajes mínimos y máximos de la CCM, que suelen oscilar entre 0.3 V y 0.9 V, el INA3221 proporciona una estabilidad y un rango de trabajo aptos para las exigencias del proyecto.

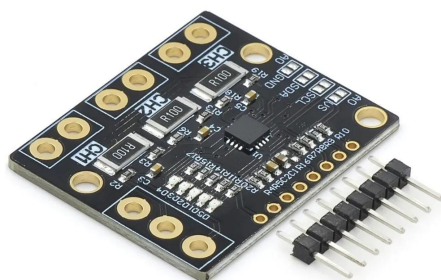


Figura 3.1: INA3221 Medidor de Voltaje y corriente.

Tabla 3.2: Especificaciones de operación del monitor INA3221.

Parámetro		Valor	Unidad
Voltaje	Suministro, V_S	6	V
Entradas analógicas	IN+, IN-	Diferencial $(VIN+) - (VIN-)^{(2)}$	V
		Modo común	V
	VBUS, VPU	26	V
Salidas digitales	Crítica, advertencia, potencia válida	6	V
	Control de tiempo	26	V
Bus serial	Línea de datos, SDA	(GND - 0.3) a +6	V
	Línea de reloj, SCL	(GND - 0.3) a $(V_S + 0.3)$	V
Corriente	Entrada en cualquier pin	5	mA
	Salida digital de drenaje abierto	10	mA

3.2.2. DHT11 Sensor de temperatura y humedad

El sensor de temperatura y humedad DHT11 (Figura 3.2) integra un complejo de sensores con una salida de señal digital calibrada. Mediante el uso de una técnica exclusiva de adquisición de señales digitales y tecnología de detección térmica y higríca, el dispositivo garantiza una alta fiabilidad y una excelente estabilidad a largo plazo. Este sensor incluye un componente de medición de humedad de tipo resistivo y un componente de medición de temperatura de coeficiente negativo (NTC), conectándose a un microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento. Esta configuración ofrece una excelente calidad, respuesta rápida, capacidad anti-interferencias y una alta rentabilidad para el monitoreo de la CCM.

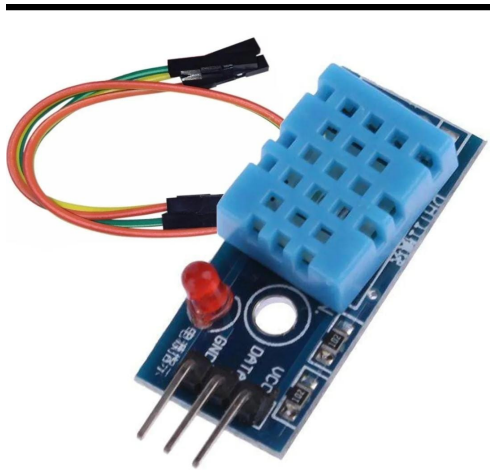


Figura 3.2: DHT11 Sensor de temperatura y humedad.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad DHT11.

Ítem	Rango de medición	Precisión	Resolución	Encapsulado
DHT11	20-90 % RH 0-50 °C	± 5 % RH ± 2 °C	1	4 pines en una sola fila

3.2.3. PH-4502C Módulo de sensor de Ph y sonda Elect

El módulo sensor de pH PH4502C de DIYMORE mostrado en la Figura 3.3) es un dispositivo electrónico diseñado para medir la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. Este sensor es ampliamente utilizado en monitoreo ambiental, acuicultura e investigación

de laboratorio debido a su versatilidad. Gracias a las dimensiones de su sonda y su rango de operación, el dispositivo se integra de manera óptima en la cámara anódica de 1.5 L de la CCM, permitiendo un seguimiento constante del crecimiento microbiano y la estabilidad del anolito.



Figura 3.3: PH-4502C Módulo de sensor de Ph y sonda Electroquímica.

Tabla 3.4: Detalles técnicos clave del sensor de pH PH4502C.

Parámetro	Especificación
Rango de medición	0–14 pH
Resolución	0,01 pH
Precisión	$\pm 0,1$ pH (a 25 °C)
Tiempo de respuesta	≤ 1 minuto
Temperatura de funcionamiento	0–60 °C
Voltaje de entrada (V_{CC})	5 V CC
Voltaje de salida (pH)	0–5 V (proporcional al valor de pH)

3.2.4. Sensor de conductividad de agua EujgooV

El sensor de conductividad (Figura 3.4) es un dispositivo especializado en la medición de la conductividad electrolítica en medios acuosos, operando bajo el principio de medición conductiva. En este método, dos electrodos miden la concentración de iones contenidos en el medio a través del flujo de corriente eléctrica. La señal de salida del sensor es una

corriente pasiva de 4–20 mA aislada galvánicamente, lo cual permite su conexión directa a dispositivos de medición y regulación (como los de ProMinent GmbH) que cuenten con una entrada compatible. Esta característica de aislamiento es fundamental para evitar bucles de tierra y asegurar la precisión en el entorno electroquímico de la CCM.

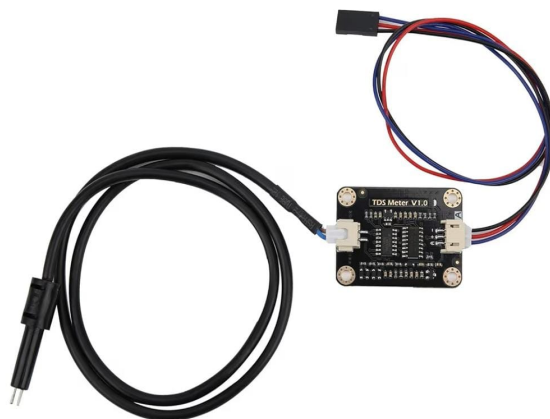


Figura 3.4: Sensor de conductividad de agua EujgooV.

3.2.5. Microcontrolados ESP32

El ESP32 (Figura 3.5) es una plataforma de desarrollo que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth de 2.4 GHz, fabricada con la tecnología de 40 nm de ultra bajo consumo de TSMC. Este dispositivo está optimizado para ofrecer un alto rendimiento de potencia y radiofrecuencia (RF), demostrando robustez, versatilidad y fiabilidad en una amplia variedad de aplicaciones. Para el procesamiento de los datos generados por los sensores de la CCM, el ESP32 representa la opción más óptima, garantizando estabilidad gracias a su arquitectura de doble núcleo. Esto facilitará la implementación de una interfaz gráfica dinámica y una transmisión de datos eficiente, asegurando la legibilidad y el monitoreo remoto de las variables del sistema en tiempo real.



Figura 3.5: ESP32.

3.3. Desarrollo del modelo experimental de la CCM

3.4. Modelo híbrido de CCM

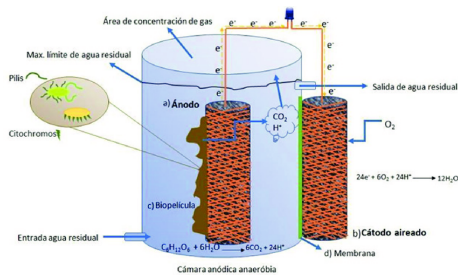
Para dar un salto de los modelos experimentales de celdas de combustible microbianas el crear un híbrido a partir de los diferentes modelos presentados anteriormente presenta varios beneficios. Es así como después de haber analizado cada uno y cada uno de sus pros y contras se presenta la opción de fabricar un híbrido entre una CCM de una cámara combinado con una CCM de flujo continuo, en la Tabla 3.5 se destacan las características fundamentales por las cuales se decidió combinar ambos sistemas.

Tabla 3.5: Ventajas de los modelos de CCM de una sola cámara y de flujo continuo.

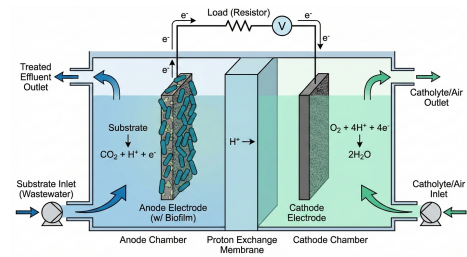
Celda de combustible microbiana de una Sola Cámara	Celda de combustible microbiana de flujo continuo
Su producción es de bajo costo.	Alta Tasa de Eliminación de DQO.
La configuración de una sola cámara tiene menor resistencia interna.	El flujo continuo permite tratar grandes volúmenes de sustrato.
Utilizan el oxígeno directamente del aire para la reacción en el cátodo.	Permite un suministro constante de sustrato manteniendo una producción de energía estable y mayor eficiencia.
Sistema efectivo para el tratamiento de aguas residuales.	Al no tener que vaciar y llenar el reactor constantemente, la biopelícula se mantiene saludable y adaptada.

3.4.1. Modelos esquemáticos de las CCMs

Después de comparar las características de cada modelo, se desarrolló el modelo unificado a partir de los modelos esquemáticos de la CCM de una cámara mostrado en la Figura 3.6a y la CCM de flujo continuo que aparece en la Figura 3.6b, se diseñará el modelo híbrido.



(a) CCM de una cámara.



(b) CCM de flujo continuo.

Figura 3.6: Modelos base utilizados para el diseño del prototipo híbrido.

3.4.2. Modelo esquemático unificado

Se diseñó un modelo de celda de combustible microbiana el cual unifica características críticas de los sistemas de una cámara y flujo continuo como se ilustra en la Figura 3.7

con el fin acoplar diversas de estas CCMs en un sistema que les suministrará sustrato continuamente. En el conexto del generador de energía este tipo de celda nos permitirá monitorear cada parámetro desde la fuente del sustrato, al igual que nos permitirá analizar cada parámetro de las celdas por separado.

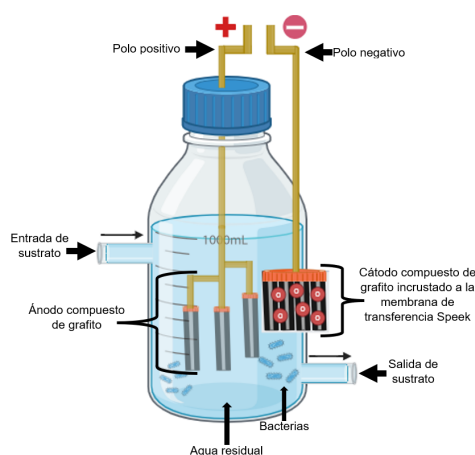


Figura 3.7: Modelo híbrido de CCM. Diseño propio elaborado en biorender.com.

3.4.3. Escalamiento de un sistema en serie

Con el propósito de simular un entorno hermético donde las CCMs estén en constante abastecimiento de sustrato y por lo tanto el uso herramientas de medición de factores biológicos nos pueda ser factible se desarrolló un sistema en serie basado en 5 CCMs híbridas interconectadas de forma paralela en un sistema de suministro y redirección continuo de sustrato. la Figura 3.8 es un modelado elaborado en biorender.com el cual detalla de manera simplificada la conexión de cada celda al tanque de suministro así como el ánodo y el cátodo de cada CCM.

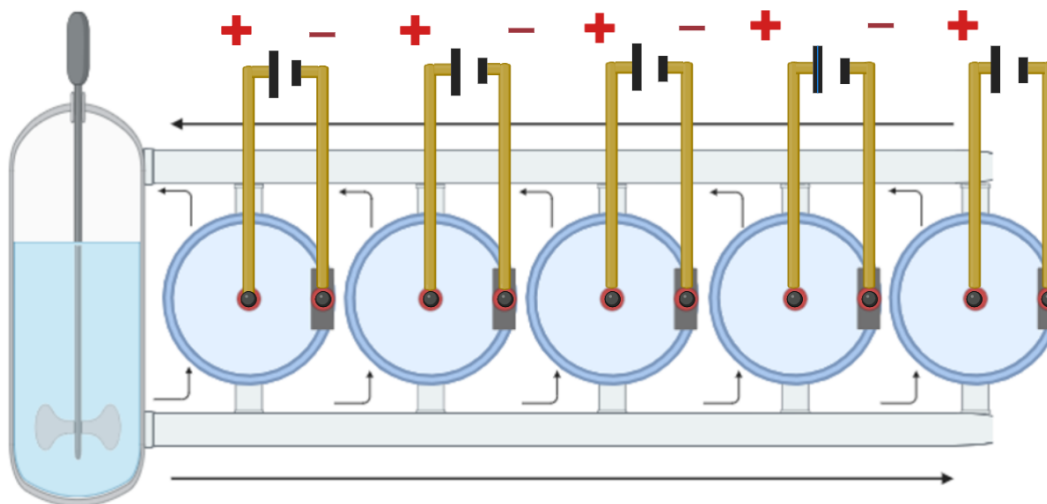


Figura 3.8: Modelado de un sistema en paralelo de flujo continuo de CCM. Diseño propio elaborado en biorender.com.

3.5. Ensamble del sistema de Celdas de Combustible Microbianas

3.5.1. Materiales

Para el desarrollo físico de la CCM se tomaron en cuenta factores de resistencia física, permeabilidad, económicos y eficiencia de los cuales su rendimiento y durabilidad en el ensayo fueron descritos en las fuentes consultadas.

- Almacenamiento principal:

Para el almacenamiento que alimentará las CCMs y recibirá el sustrato proveniente de estas, se optó por el reciclaje de un contenedor de Polietileno de Alta Densidad de 5L representado en la Figura 3.9, su capacidad, tamaño y resistencia lo hacen ideal ser usado como banco de sustrato para las CCM.



Figura 3.9: Tanque principal que alimenta las CCMs.

- Almacenamiento de CCM:

Como recipiente de cada CMM se decidió trabajar con recipientes de Polipropileno (PP) representado en la Figura 3.10 de venta comercial debido a su sellado hermético simple el cual nos va a permitir trabajar el interior de la celda de manera rápida y poco invasiva.



Figura 3.10: Recipientes que serán las cámaras de las CMMs.

- Suministro y conexión del sistema:

Las conexiones entre las CCM y el recipiente que suministra el sustrato se implementará una manguera flexible y transparente de PVC igual a la presentada a la Figura 3.11 con un diámetro de 1/2 pulgada ideal debido a su maleabilidad y la facilidad de modificar.



Figura 3.11: Manguera para suministrar el sustrato.

- Ánodo:

El Ánodo compuesto se constituirá de alambre de cobre de 1mm de grosor como se ob-

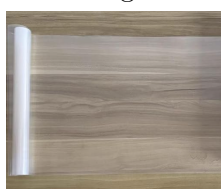
serva el la Figura 3.12a el cual en el extremo sumergido tendrá una unión con electrodos de grafito de 3.54 Pulgadas, mostrado en la Figura 3.12b.



Figura 3.12: Materiales para el ánodo.

- Cátodo:

Al igual que el ánodo, el cátodo se constituirá de alambre de cobre de 1mm de grosor mostrado en la Figura 3.13a el cual en un extremo tendrá una unión con electrodos de grafito de 3.54 Pulgadas ver Figura 3.13b sumando a su composición la membrana de transferencia SPEEK mostrado en Figura 3.13c.

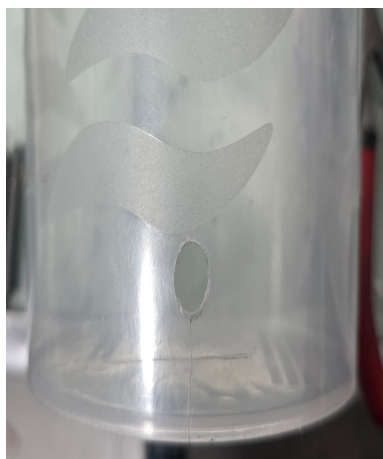


(c) Membrana Speek.

Figura 3.13: Materiales para el cánodo.

3.5.2. Montaje de los componentes del sistema

- Adecuación de los recipientes: En los contenedores de las CMM se realizaron cortes del diámetro de la manguera ver Figura 3.14a, así como un corte rectangular mostrado en la Figura 3.14b, donde irán posicionados la membrana y el cátodo y En el recipiente de Almacenamiento se abrieron dos orificios, uno del diámetro de la manguera y otro de un diámetro mayor para el acoplamiento de una boquilla conectora de manguera y en la parte superior se realizó un corte cuadrado para la instalación de los equipos de medición como se muestra en la Figura 3.14c.



(a) Modificación a la cámara.



(b) Modificación a la cámara.



(c) Modificación al tanque principal.

Figura 3.14: Modificación a los recipientes utilizados.

- Modificación de la manguera:

Ante la falta de disponibilidad de conectores compatibles con el diámetro de la manguera requerida, se optó por implementar una solución alternativa basada en la modificación directa del material. Para ello, se realizaron diversos cortes en la manguera y se procedió a su unión mediante el uso de un cautín, conformando un arreglo compuesto por cinco fragmentos. Esta configuración permitió establecer una línea principal con cinco entradas y cinco salidas, asegurando la continuidad del flujo y la funcionalidad del sistema. El procedimiento se diseñó de manera que la estructura resultante pueda integrarse de forma eficiente en el montaje experimental, tal como se ilustra en la Figura 3.15, constituyendo un paso metodológico relevante en la construcción del prototipo.



Figura 3.15: Manguera modificada para suministrar las cinco cámaras.

Adecuación de los Electrodo de grafito:

Para garantizar un contacto uniforme entre las barras de grafito y la membrana de transferencia, se procedió a realizar un pulido controlado en uno de los extremos de cada barra, utilizando una lija de grano adecuado hasta obtener una superficie plana y homogénea. Adicionalmente, se efectuó un desgaste transversal en la zona destinada a la conexión eléctrica, lo que permitió fijar de manera segura el cable de cobre. Este procedimiento asegura tanto la eficiencia en la transferencia de electrones como la estabilidad mecánica de la unión, aspectos fundamentales para el correcto desempeño del sistema experimental.

3.6. Circuito electrónico

Para el desarrollo de nuestro circuito electrónico se llevó a cabo la elaboración de un diagrama de trabajo para un entendimiento visual de los recursos previamente adquiridos y necesidades en software de nuestro sistema de monitoreo, en el diagrama de la Figura 3.16 se expresa como todas las entradas de datos comienzan desde el sistema de de generación de energía los sensores miden los datos obtenidos del sustrato, el microcontrolador los precosesa y finalmente se despliegan en la consola mediante un listado.

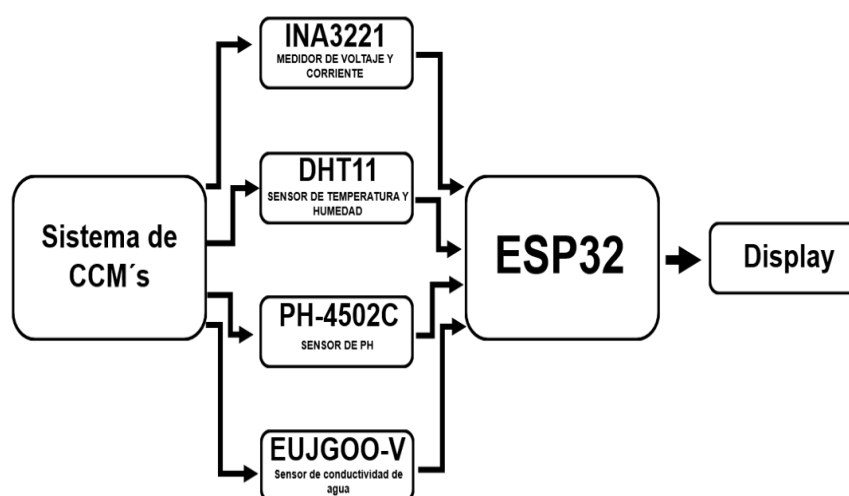


Figura 3.16: Diagrama de flujo del desarrollo del circuito.

3.6.1. Diseño esquemático

Previo al ensamble físico, se diseñó el circuito en un plano esquemático presentado en la Figura 3.17 en el software Proteus, el cual nos servirá principalmente para interactuar con una simulación del sistema antes de su ensamble donde podremos ejecutar el código fuente que controlará el flujo del sustrato y realizará las mediciones requeridas, además de servirnos como una guía de conexiones en el momento del ensamble.

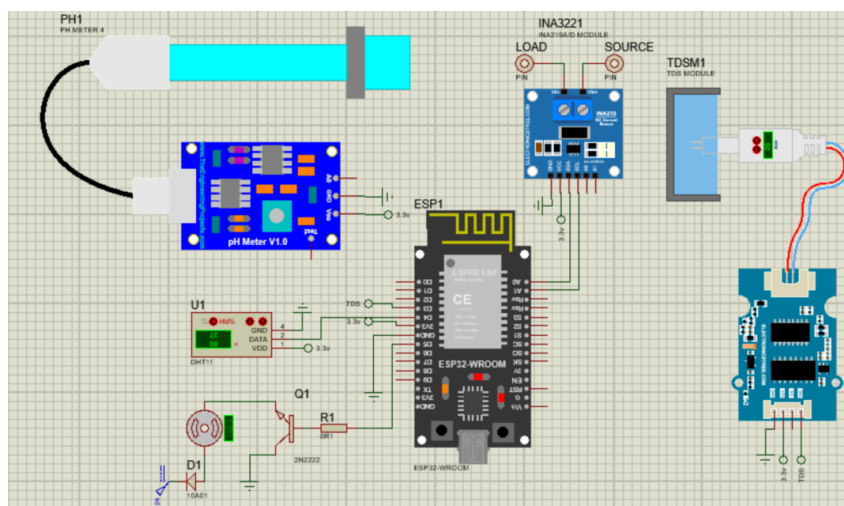


Figura 3.17: Diagrama esquemático del circuito electrónico.

3.6.2. Montaje en protoboard

Posterior al diseño del modelo esquemático del circuito que controlará el flujo del sustrato y la medición de cada parámetro del sustrato y el sistema, se elaboró el prototipo físico del circuito desarrollado, la Figura 3.18 es una imagen tomada durante su prueba de funcionamiento

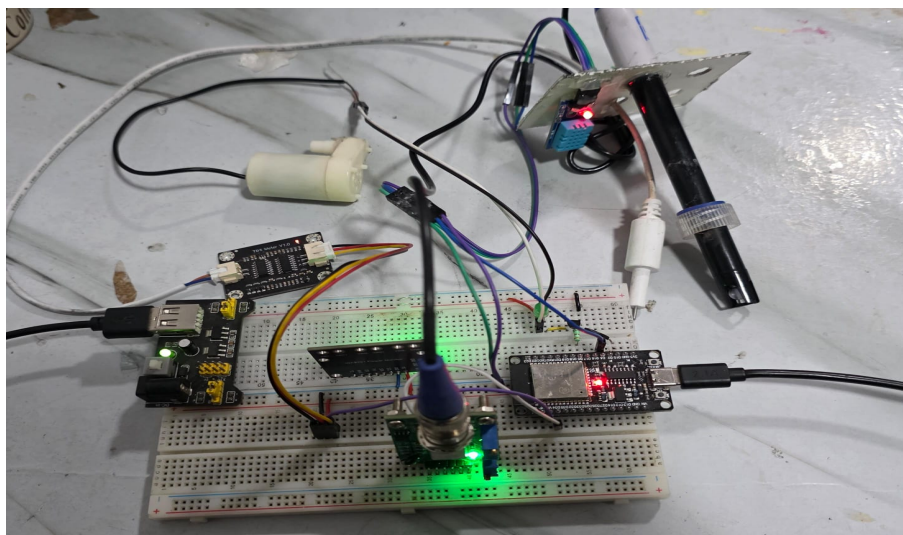


Figura 3.18: Prueba de funcionamiento del circuito electrónico previo a su ensamblaje

El ensamble de esta parte del sistema se llevó acabo en la unión de dos protoboards

para tener debido a que el espacio que el uso de una no nos era suficiente para acoplar de manera continua cada modulo debido a sus dimensiones, a pesar de esto se buscó que el ensamble fuera lo más reducido posible para evitar falsos contactos, interferencias o resistencias generadas por el diámetro de los cables.

Teniendo en cuenta que todos los sensores utilizados están desarrollados de manera que, solo hay que conectar las entradas de voltaje y datos al microcontrolador y no hace falta añadir un componente electrónico extra para su funcionamiento se se decidió que debido a su facilidad de conectar no se imprimiría el circuito desarrollado en PCB ya que elevaría el costo total de proyecto y aplazaría el tiempo del ensayo.

3.7. Cronología de montaje del sistema de CCM

1.- La primera parte del montaje de las CCM fue la unión de cada electrodo de grafito con hilo trenzado conductor como se muestra en Figura 3.19.



Figura 3.19: Electrodos modificados

2.- Seguido de la unión de la membrana de transferencia Speek con cada recipiente de la CCM usando silicón caliente, ver Figura 3.20.

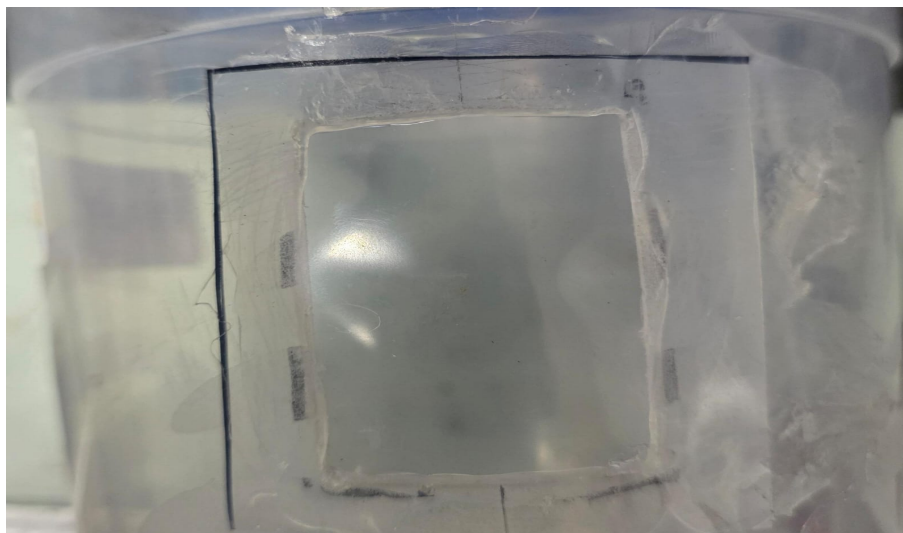


Figura 3.20: Membrana de transferencia Speek unida a la cámara ánidoca.

3.- En la parte de la tapa del recipiente, para mantener firmeza en ánodo se usó un alambre no conductor de mayor calibre el cual sostiene una pieza circular de plástico por el cual se suspenden los electrodos cubriendo una mayor área dentro de la cámara.

4.- Como último paso se unieron los electrodos de grafito con cara plana sobre las membranas de transferencia Speek sellando con polvo húmedo de grafito cualquier separación que hubiera entre los electrodos para evitar el contacto directo del oxígeno con las membranas de transferencia.

3.8. Cronología de adecuamiento del tanque de almacenamiento

1.- En el orificio del mismo diámetro de la manguera se introdujo el extremo que realizará el suministro del sustrato de forma intermitente a través de una bomba de agua de 5v, en el orificio de diámetro mayor se incrustó la boquilla que se conecta con la manguera que devuelve el sustrato al tanque proveedor.

2.- En el orificio superior se adaptó una pieza de plástico en la cual se incrustan los sensores con los que se va a trabajar.

3.9. Cronología del montaje del sistema completo

1.- Una vez que las mangueras están sujetas al recipiente de almacenamiento, el recipiente y las CMM se alinearon y fijaron a una base de plástico con silicón caliente

2.- Se incrustaron las boquillas de cada manguera en las salidas y entradas de cada CCM recubriendo los bordes para evitar fugas de sustrato.

3.- Se colocaron y sellaron las tapas de las cámaras, el orificio por donde pasa el ánodo se recubrió con silicón caliente y el sello de la tapa se recubrió con plastilina para evitar el paso de oxígeno a las cámaras.

4.- En la última parte del montaje en la tapa superior del tanque de almacenamiento se montaron los sensores encargados del análisis de las propiedades y estado del sustrato además de una bomba adicional para drenar el sustrato.

3.10. Obtención del sustrato

Para la obtención del sustrato se recurrió a una de las principales fuentes de contaminación del Río Tula en Progreso de Obregón Hgo. el cual es un vertedero de aguas residuales municipales que desemboca directo en el río la Figura 3.21 es una fotografía de la zona, en la cual, antes de desembocar en el río se crea un estanque del cual desembocan múltiples, de ese estanque se obtuvo una muestra de aproximadamente 11 litros de Agua residual.



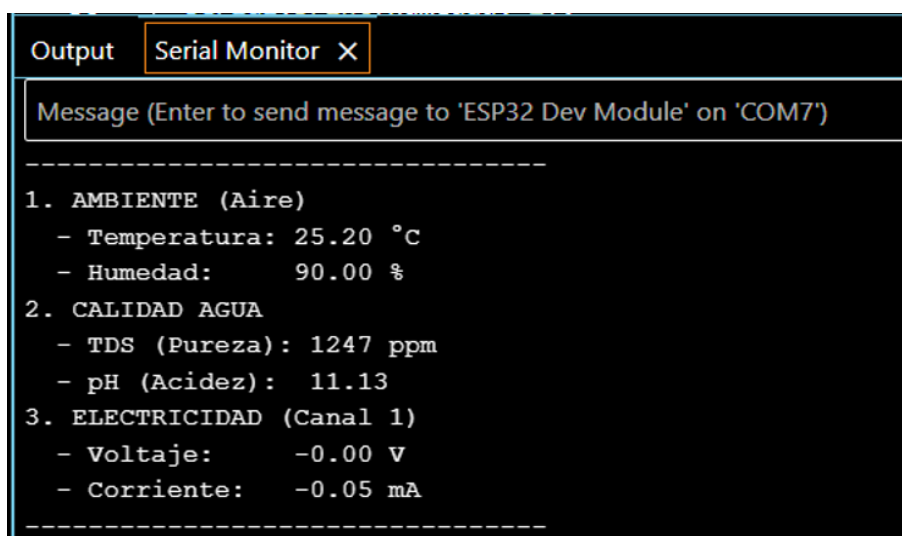
Figura 3.21: Desagüe de aguas residuales del cual se obtuvo la muestra para el desarrollo del ensayo.

3.11. Inicio de proceso

Se suministraron aproximadamente 11 litros de el sustrato obtenido continuamente en el contenedor principal mientras la bomba estaba encendida continuamente para generar presión dentro de la tubería y que el sustrato corriera de manera igualitaria hacia todas las celdas.

Para crear un vacío dentro de las cámaras se optó por colocar las tapas hasta que cada celda llegara hasta el limita de su capacidad y así evitar la concentración de oxígeno dentro de las cámaras.

Una vez que las celdas llegaron a su capacidad máxima se colocaron las tapas y se sellaron con plastilina e inició el proceso de medición de los parámetros biológicos y de generación de energía, la Figura 3.22 es la primer medición realizada por el sistema ensamblado.



The image shows a screenshot of a 'Serial Monitor' window. The title bar includes 'Output' and 'Serial Monitor' with a close button. Below the title bar is a text input field with the placeholder 'Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM7')'. The main area of the window displays sensor data in a structured format, separated by dashed lines. The data is organized into three numbered sections: 1. AMBIENTE (Aire), 2. CALIDAD AGUA, and 3. ELECTRICIDAD (Canal 1). Each section lists specific measurements with their units.

```
-----  
1. AMBIENTE (Aire)  
  - Temperatura: 25.20 °C  
  - Humedad:    90.00 %  
2. CALIDAD AGUA  
  - TDS (Pureza): 1247 ppm  
  - pH (Acidez):  11.13  
3. ELECTRICIDAD (Canal 1)  
  - Voltaje:     -0.00 V  
  - Corriente:   -0.05 mA  
-----
```

Figura 3.22: Despliegue de datos obtenidos mediante las mediciones de los sensores.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados

4.1.1. Pruebas realizadas con el modelo diseñado

Se sometió esta configuración cerrada de sistema de CCMs a una prueba ininterrumpida con el propósito de analizar la asociación de las condiciones físicas de cada módulo con el rendimiento y la eficiencia en la producción y manteniendo de un voltaje máximo estable continuo. Como se especificó anteriormente se trabajó con una muestra de aproximadamente 11 litros de sustrato, con esta muestra se espera llegar a una estimación de rendimiento por día de este tipo de sustrato al ser sometido al paso constante por las CCMs, se espera concluir con la prueba una vez que las celdas pierdan rendimiento debido a la falta de materia orgánica en el sustrato.

4.1.2. Operación y resultados de la CCM1

El Módulo número 1 de CCM inició el desarrollo de la prueba con normalidad, sin embargo durante el estudio presentó deficiencias en la generación de energía. Esta celda no pudo mantener una elevación de voltaje continúa presentando repuntes y caídas severas durante todo el estudio.

En el inicio de la prueba la corriente de sustrato suministrada para llenar las celdas, logró crear un vacío dentro de la celda sin embargo después de estabilizarse el contenido de la celda empezó a disminuir como se observa en la Figura 4.1 ocasionando que la principal

deficiencia de este módulo fue que no logró de generar un vacío dentro de la cámara dejando aproximadamente medio centímetro de aire dentro de la celda, esto debido a la falta de presión del modelo para expulsar todo el aire dentro del recipiente.



Figura 4.1: Nivel no optimo de sustrato en la CCM1.

A medida que el voltaje disminuía y la corriente de sustrato lograba llenar completamente el módulo se optó por generar el vacío de forma manual logrando llenar la celda generando un efecto de vacío al bombear el sustrato presionando repetidas veces la tapa, lo cual generó un aumento en el nivel del sustrato lo cual derivó en un repunte en el voltaje producido (536mv) pero menor a su primer pico generado en el cuarto día de pruebas. (581mv)

Después de haber intervenido la celda tanto el voltaje como el nivel de sustrato no se pudo mantener al nivel máximo, lo que propició una caída drástica en el Voltaje generado en este punto se decidió no intervenir una segunda vez la celda con el fin de observar que tan drástica es la disminución del rendimiento con oxígeno dentro de la cámara. El resultado de haber intervenido la celda a mitad del ensayo y el desarrollo posterior a que se dejó el oxígeno dentro de la cámara se ve reflejado en la Figura 4.2 que muestra los dos picos de voltaje en y la disminución acelerada al encontrar oxígeno dentro de la cámara.

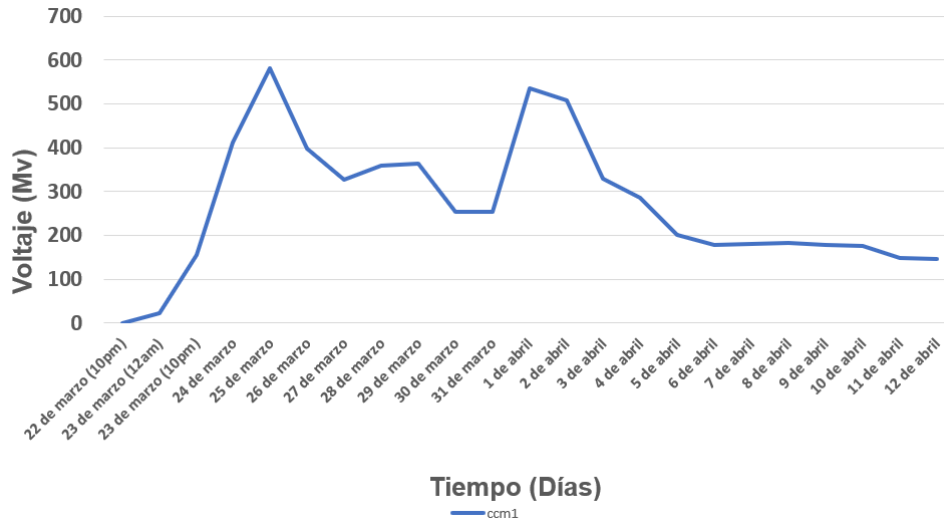


Figura 4.2: Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.

Con los resultados obtenidos se procedió a calcular el Diferencial de potencial:

$$DP = \frac{(0,581V)^2}{(1000\Omega) * (4,3 \times 10^{-3})} = 72,082 \text{ mW/m}^2 \quad (4.1)$$

4.1.3. Operación y resultados de la CCM2

El segundo modulo operativo de CCM del sistema destacó negativamente por ser el módulo que más variación en energía producida tuvo durante su fase experimental. Este módulo al igual que el anterior inició la operación de manera positiva generando un pico de voltaje de 649mv presentando una mejor eficiencia que el primer módulo, sin embargo al igual que la primera celda presentó una disminución drástica en el voltaje generado debido a misma falla en el llenado, generado que se presente oxígeno dentro de la cámara con la singularidad que la cantidad de oxígeno disminuía cuando el suministro de sustrato iniciaba e incrementaba cuando el suministro paraba. La Figura 4.3 muestra el nivel de sustrato que tenía la CCM durante el primer día de el ensayo.



Figura 4.3: Fotografía de la condición de la CCM.

Este fenómeno se presentó durante la primera mitad del ensayo dándonos un decrecimiento con subidas drásticas de voltaje hasta el treceavo día donde el nivel de sustrato de la celda disminuyó a un nivel inferior que la primera CCM ocasionando una caída drástica de voltaje como se puede en el gráfico de rendimiento de la Figura 4.4.

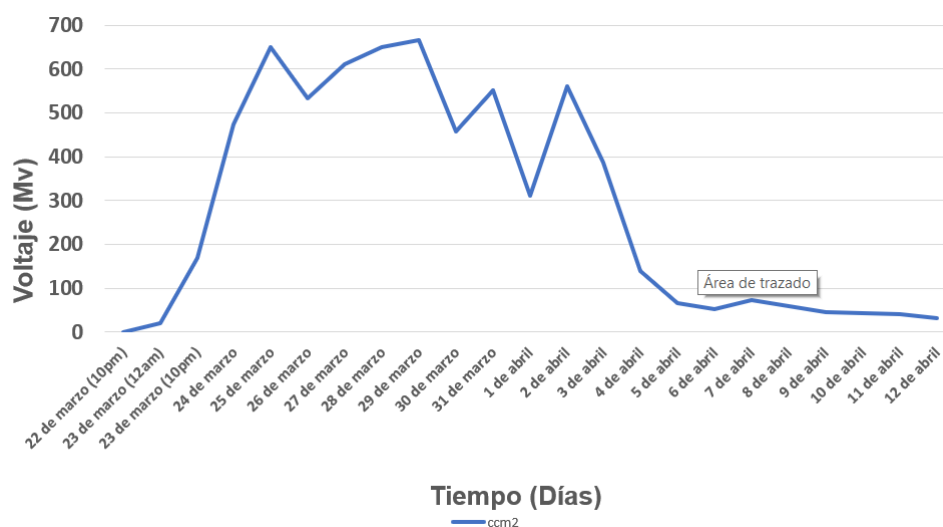


Figura 4.4: Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo

Una vez con los resultados obtenidos se procedió a calcular su diferencial de potencial a partir de la siguiente formula.

$$DP = \frac{(0,665 \text{ V})^2}{(1000\Omega) * (4,3 \times 10^{-3})} = 102,843 \text{ mW/m}^2 \quad (4.2)$$

4.1.4. Operación y resultados de la CCM3

El módulo numero 3 fue el que más destacó entre las cinco celdas. Esta celda se caracterizó por ser la única celda que pudo crear un vacío completo dentro del recipiente como se logra observar en la Figura 4.5 y esto se plasma en su rendimiento.



Figura 4.5: Fotografía de la condición de la CCM3.

Esta celda desde el inicio destacó generando 63mv en las primeras dos horas de operación y sobre todo en su rendimiento general puesto que este módulo tuvo un incremento constante y acelerado en el voltaje que generaba llegando al cuarto día de pruebas con un voltaje 712mv.

En el gráfico elaborado a partir de su rendimiento representado en la Figura 4.6 se puede observar que; durante la primera mitad de la prueba se pueden observar picos voltaje similares como el 28 de marzo que fue de 759mv y el 3 de abril que fue de 765mv de igual manera se produjeron reducciones voltaje mínimas con valores que oscilan entre los 686mv y 697mv.

El día quince de la prueba tras alcanzar su voltaje máximo de 765mv la celda tuvo una caída en el voltaje generado que concuerda con la caída del resto de las celdas sin embargo esta caída no fue drástica como si lo fue con las demás, pues encontró un punto de estabilización que rondó los 700mv y 715mv.

Una vez que la celda encontró su punto de estabilización la energía generada durante la última etapa del estudio empezó a caer de manera gradual como se observa en los tres últimos días debido a la remoción de materia orgánica generado por las bacterias alojadas en la biopelícula.

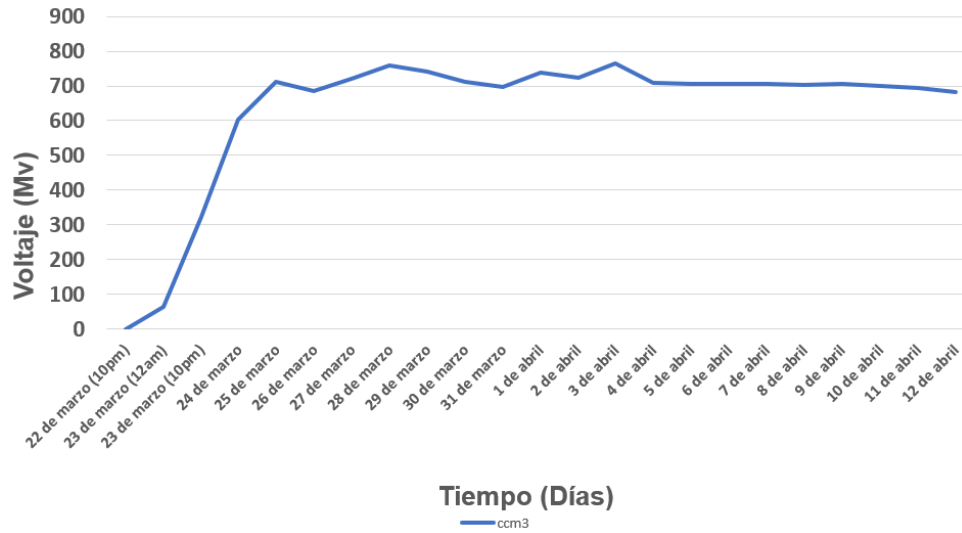


Figura 4.6: Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.

Una vez con los resultados obtenidos se procedió a calcular su diferencial de potencial a partir de la siguiente formula.

$$DP = \frac{(0,765 \text{ V})^2}{(1000\Omega) * (4,3 \times 10^{-3})} = 136,098 \text{ mW/m}^2 \quad (4.3)$$

4.1.5. Operación y resultados de la CCM4

La celda de combustible numero 4 fue la segunda celda con mejor desempeño dentro del sistema, presentando deficiencias en su llenado en menor medida que las celdas número uno dos y cinco ya que esta alojó una burbuja de agua de aproximadamente la mitad del diámetro de la tapa como se observa en la Figura 4.7, sin embargo, su desempeño en la generación de energía no se vio afectado de la misma manera como las celdas uno dos y cinco.



Figura 4.7: Fotografía de la condición de la CCM

El gráfico presentado a partir de su desarrollo en la Figura 4.8 muestra que esta celda presentó variaciones en su voltaje generado durante la primera mitad del ensayo con picos de 604mv, 643mv y 684mv y estabilizándose alrededor de 500mv. En la segunda mitad del ensayo a diferencia de la CCM 3, la CCM 4 tuvo una caída drástica luego de alcanzar su pico de 684mv empezó a tener una caída gradual en su voltaje generado.

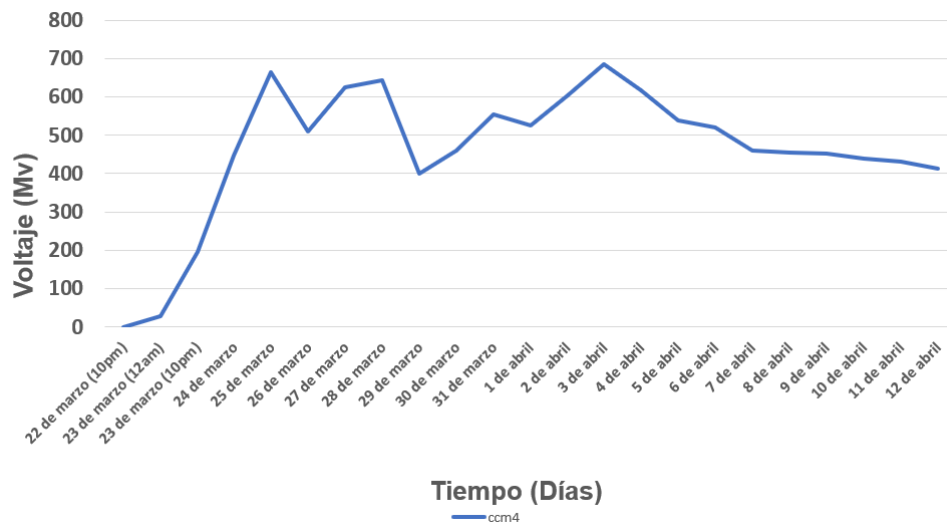


Figura 4.8: Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.

Una vez con los resultados obtenidos se procedió a calcular su diferencial de potencial

a partir de la siguiente formula.

$$DP = \frac{(0,684 \text{ V})^2}{(1000\Omega) * (4,3 \times 10^{-3})} = 108,803 \text{ mW/m}^2 \quad (4.4)$$

4.1.6. Operación y resultados de la CCM5

La celda última celda conectada en el sistema fue la que más deficiencias y modificaciones sufrió durante todo el estudio, esto generó que fuera el segundo modulo con peor desempeño tuvo.

Durante la primer mitad del ensayo al obtener mediciones de una generación de voltaje tan baja se trató de elevar el nivel de sustrato creando el efecto de vacío de manera manual como en las celdas uno y dos, pero esta medida no resultó favorable puesto que el nivel de sustrato no lograba subir como en los ejemplos anteriores, así que se intentó crear el vacío succionando el aire a través de una jeringa esta medida tampoco evitó que se siguiera alojando una gran cantidad de oxigeno en la cámara como se observa en la Figura 4.9.

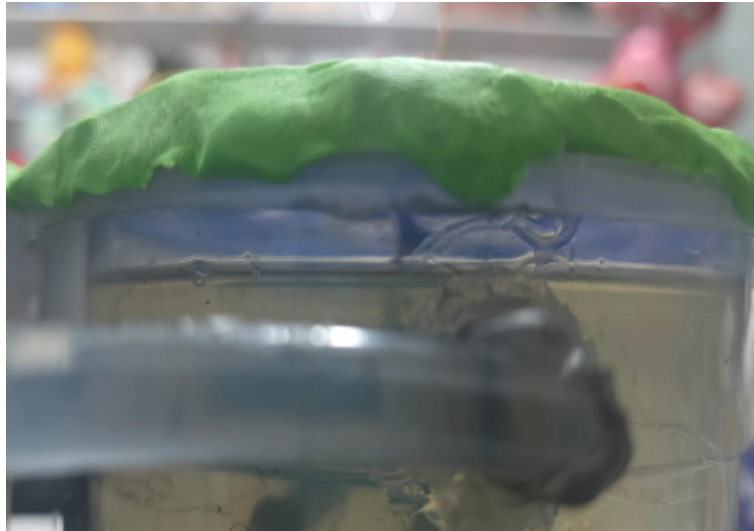


Figura 4.9: Fotografía de la condición de la CCM.

Esta fue la última en la cadena de suministro del sistema desarrollado por lo cual se estima que la presión en el flujo que recibía no era suficiente para llenar en su totalidad la celda esto ocasiono que fuera la celda que más oxigeno alojó y esto se ve reflejado en su rendimiento. El cual se puede observar en la Figura 4.10 donde se obserba que a diferencia de las cuatro celdas anteriores esta fue la que en las primeras dos horas solo generó 9mv

además de tener un incremento de voltaje poco acelerado a diferencia de los ejemplos anteriores que tuvieron un incremento acelerado los primeros días de ejecución.

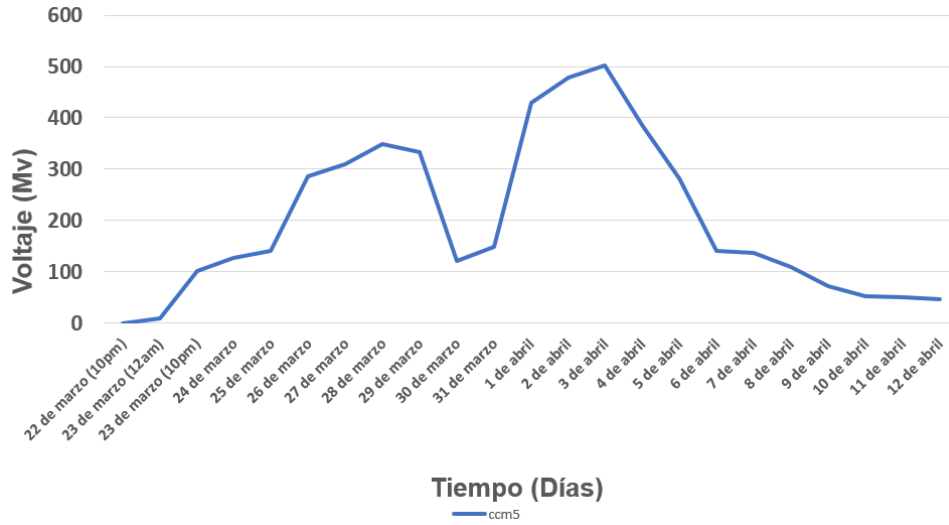


Figura 4.10: Gráfica del desempeño de la ccm durante el periodo del ensayo.

Con los resultados obtenidos se procedió a calcular su diferencial de potencial a partir de la siguiente formula.

$$DP = \frac{(0,502 \text{ V})^2}{(1000\Omega) * (4,3 \times 10^{-3})} = 58,605 \text{ mW/m}^2 \quad (4.5)$$

4.1.7. Comparación conjunta de resultados

Tras el análisis de cada CMM por separado se desarrolló una serie de comparativas de las cinco celdas con el propósito de analizar los datos y observaciones más relevantes del sistema en conjunto. En la Tabla 4.1 se colocaron puntos clave del análisis del sistema en conjunto como el voltaje inicial, voltaje máximo, voltaje al final del ensayo, la densidad de potencial calculada y una estimación de su desempeño.

Tabla 4.1: Resultados detallados de voltaje y densidad de potencia de las CCM híbridas.

CCM	V. Inicial (2h)	V. Max	V. Final	DP	Desempeño
CCM No. 1	0.023 V	0.581 V	0.145 V	72.082 mW/m^2	Variable
CCM No. 2	0.019 V	0.665 V	0.031 V	102.843 mW/m^2	Variable
CCM No. 3	0.063 V	0.765 V	0.683 V	136.098 mW/m^2	Estable
CCM No. 4	0.027 V	0.684 V	0.414 V	108.803 mW/m^2	Variable
CCM No. 5	0.009 V	0.502 V	0.047 V	58.605 mW/m^2	Variable

En el gráfico de la imagen 4.11 se puede observar una comparativa de desempeños de todas las celdas del sistema a lo largo de las tres semanas de pruebas realizadas, donde se puede observar la variabilidad que tuvieron las delcads uno, dos, cuatro y cinco y como la celda con mayor desempeño fue la celda número tre.

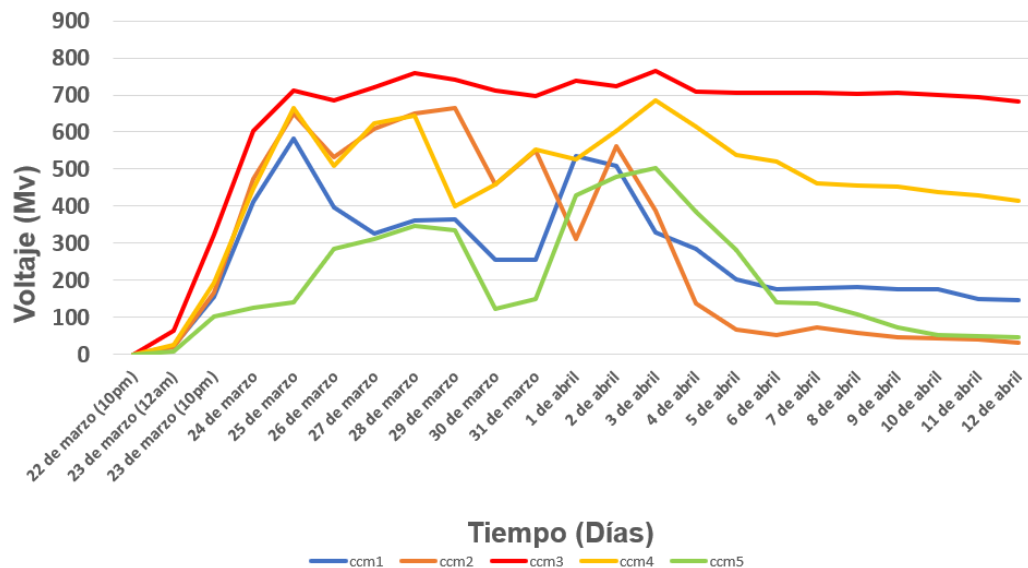


Figura 4.11: Gráfica comparativa de los resultados obtenidos de las cinco celdas.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

Tras concluir con el ensayo del prototipo y plasmar los resultados obtenidos durante el periodo de prueba se llegó a múltiples conclusiones y observaciones derivadas del observado durante funcionamiento del sistema y el rendimiento experimentado.

5.1. Áreas de oportunidad y trabajo a futuro

A lo largo del ensayo se detectaron múltiples deficiencias alrededor del sistema y los módulos de CCMs todas se tomaron en cuenta para hacer retroalimentación y en el futuro mejorar y ampliar el sistema tomando en cuenta los siguientes puntos

5.1.1. Puntos críticos de la composición de la CMM

El recipiente: La forma cilíndrica del recipiente fue el principal obstáculo para poder trabajar de manera optimizada con materiales prefabricados como fueron las barras de grafito con el cátodo ya que al haber una curvatura y a pesar de la adaptaciones que se hicieron, se estima que en las celdas tuvieron filtraciones de oxígeno sumando una causa por la cual el rendimiento se vio afectado. Un punto a destacar en la celda numero tres es que pece a ser la celda que mayor eficiencia tuvo al ser la única celda que creó un vacío interno debido a la presión esto ocasionó que el sustrato se filtrara por el sello de la tapa que no era completamente hermético.

Cátodo: Construir el cátodo a partir de las varillas de grafito que se compraron fue el principal factor por el cual las primeras pruebas en de forma estática fallaron al no haber un contacto al 100 % con la membrana SPEEK, a pesar de haber adaptado las piezas de

grafito tallando sus caras y rellenando el espacio entre la membrana y los cátodos no se pudo garantizar un contacto uniforme entre los dos materiales.

Terminales y cable empleado: El alambre empleado para el ánodo y el cátodo resultó excelente como conductor y en el diseño del sistema debido al ser tan delgado su adaptabilidad fue excelente para evitar protuberancias que pudieran fungir como entradas de oxígeno no deseadas, sin embargo, en la práctica el entrelazar cada terminal con el sistema de medición y al multímetro externo se fueron deteriorando llegando al punto de quebrarse terminales de las celdas cuatro y uno.

5.1.2. Puntos críticos del sistema

Bomba: en la práctica la principal deficiencia del sistema de bombeo fue la potencia de la bomba, debido a que no fue lo suficientemente elevada para alimentar los cinco módulos de un litro y medio generando que las celdas no generaran un vacío dentro de las cámaras.

Sistema de suministro y retorno, Para esta parte crucial del sistema se implementó la adaptación la manguera mencionada en anteriormente debido a no encontrar uniones en T del diámetro de nuestra manguera. En la práctica presentó múltiples fugas en las uniones las cuales una vez puesto en marcha el prototipo y unidas todas las celdas fueron tratadas con dificultad debió a la circulación del sustrato y la ubicación de las fugas.

Distribución: La configuración en paralelo en un plano horizontal también fue un factor determinante ya que debido a la distancia entre la ultima celda y el recipiente que suministra el sustrato se pierde fuerza en la corriente que impacta en el suministro de la última celda.

Después de identificar las áreas de oportunidad en el primer prototipo se plantearon mejoras en el diseño y en los materiales utilizados en cada bloque del sistema.

5.1.3. Reestructuración de la composición de la CMM

Recipiente: Se planteó cambiar a un recipiente de una forma cilíndrica a una cubica, el cual para facilidad de trabajar en la parte interna con él ya sea para el ensamble, limpieza o mantenimiento, una de sus caras siga siendo removible con la principal demanda que esta vez sea 100 % hermética.

Forma de cátodo: Para este punto es destacable que tanto como las cátodos empleados como los residuos generados por tallarlos y crear una superficie plana pueden ser completamente reutilizables para crear nuevamente un cátodo compuesto que se pueda

adaptar 100 % con la cara de la nueva cámara para asegurar una completa adhesión con la membrana SPEEK.

Terminales: Para este punto implementar terminales removibles en el cátodo y el ánodo tanto para el estudio de la celda como para la conexión en el sistema de generación lo hace más práctico y duradero.

5.1.4. Reestructuración del diseño del Sistema

Implementación de un flujo lineal: El siguiente paso para la aplicación en mayor volumen es la creación de un sistema de flujo lineal que sea capaz de procesar una cantidad mayor de aguas residuales.

Sistema de distribución: Para asegurar un flujo continuo dentro del sistema evitar fugas y mejorar la durabilidad y permeabilidad se plantea sustituir la manguera de PVC flexible por una sólida con la ventaja de que existen mayor cantidad de conectores disponibles.

Distribución: En los diseños propuestos con anterioridad se planteó implementar una distribución de celdas que aprovechara la fuerza de gravedad para el sistema de llenado y mantener la presión constante requerida dentro de las celdas pero se descartó al haber la posibilidad de requerir de dos bombas dentro del sistema, al tratarse de un sistema lineal esta opción vuelve a ser viable y atractiva al contemplar las áreas donde se pueda implementar un sistema en masa.

Aislamiento en cada celda: Desarrollar un sistema de aislamiento que sea capaz de cortar la continuidad del flujo si así se requiere de forma automática sin pérdida o derramamiento de sustrato.

5.2. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo sobrepasó mi umbral del conocimiento que tenía sobre la situación ambiental en el estado y desarrollé conciencia sobre las deficiencias que hay en infraestructura, educación ambiental y sobre todo en el compromiso para preservar el medio ambiente.

Los resultados obtenidos son evidencia de la capacidad generativa que tiene un sistema cerrado de generación de energía a partir de celdas de combustible microbianas de una sola cámara de flujo continuo teniendo rendimientos de hasta 765Mv como se demostró en la celda número tres marcándose como un referente y una meta a rebasar en el desarrollo de modelos futuros.

Al comparar esta investigación con trabajos realizados en celdas de diferentes configuraciones de modo estacional que generaron un voltaje máximo igual o mayor, se puede observar como el tiempo en el que se mantiene de el pico máximo de voltaje en esta investigación es mayor debido al sistema de alimentación continua.

El ensayo realizado con la muestra obtenida del desagüe del drenaje municipal dejó evidencia de como la abundante carga biológica que se encuentra en las Aguas residuales municipales mantuvo optima la generación de energía en las celdas número tres y cuatro con voltajes superiores a los 600Mv, dándole un valor agregado sumamente importante a los residuos generados por la población el cual propiciaría su explotación para la generación de energía a la par de su tratamiento, reduciendo así el impacto al medioambiente y la dependencia de métodos anticuados para la generación de energía.

El modelado y producción de un prototipo funcional dejó marcados las condiciones en las que un sistema a partir de agentes biológicos tiene que operar para generar un rendimiento significativo lo cual maraca un presente para el rediseño del modulo de celda de combustible microbiana y la reconfiguración del sistema de CCMs.

Bibliografía

- [1] Liliana Alzate-Gaviria, Carmen Fuentes-Albarrán, Alberto Álvarez-Gallegos, and J Sebastián. Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem. *Interciencia*, 33(7):510–517, 2008.
- [2] Hannah Bird, Elizabeth Susan Heidrich, Daniel David Leicester, and Pavlina Theodosiou. Pilot-scale microbial fuel cells (mfcs): A meta-analysis study to inform full-scale design principles for optimum wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 346:131227, 2022.
- [3] Dyanne Cárdenas, José Ricardo Villegas, Carlos Solís, Jean Sanabria-Chinchilla, L Uribe, and Paola Fuentes-Schweizer. Evaluación del desempeño de una celda de combustible microbiana con electrodo de grafito modificado para el tratamiento de agua residual del procesamiento del café. *Revista Colombiana de Química*, 51(1):40–47, 2022.
- [4] Arely Cárdenas Robles, Carlos D Alvarado Rodríguez, Emma G Pichardo Ramos, Jesús D Martínez Landin, Eduardo Camacho Chávez, Martha C Rodríguez Aguilar, Víctor Pérez Moreno, Miguel Á Rico Rodríguez, et al. Celdas de combustible microbiano como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*, 2022.
- [5] Jesús A QUINTERO CARDOZO, Luis F PRADO-CASTILLO, Gustavo GRANADOS ZARTA, Edwin M MENESES QUINTERO, and Hernán DEVIA. Integración de la biodiversidad en la reducción de la contaminación en agua. *q*, .
- [6] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ley de aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación, 1992. Última reforma publicada en el DOF el 08-05-2023.

- [7] Milenio Digital. En Hidalgo, sólo el 22.7 por ciento del agua residual recibe tratamiento. *Milenio*, Marzo 2024. Consultado el 12 marzo de 2026.
- [8] N Duteanu, Benjamin Erable, SM Senthil Kumar, Makarand Madhao Ghangrekar, and Keith Scott. Effect of chemically modified vulcan xc-72r on the performance of air-breathing cathode in a single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 101(14):5250–5255, 2010.
- [9] Environmental Justice Atlas. Planta tratadora de aguas residuales (PTAR) Atotonilco, de Tula, Hidalgo, México. Environmental Justice Atlas, 2017. Reporte de conflicto ambiental.
- [10] Michael Faraday. Vi. experimental researches in electricity.-seventh series. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 124:77–122, 1834.
- [11] Oscar Guadarrama-Pérez, Víctor Hugo Guadarrama-Pérez, Alexa Carolina Guevara-Pérez, Rosa Angélica Guillén-Garcés, Luis Gerardo Treviño-Quintanilla, et al. Celdas de combustible microbianas: una evolución sustentable en la producción de bioelectricidad. *0*, 2025.
- [12] Falk Harnisch and Uwe Schröder. From mfc to mxc: chemical and biological cathodes and their potential for microbial bioelectrochemical systems. *Chemical Society Reviews*, 39(11):4433–4448, 2010.
- [13] Miguel Ángel Hilario Contreras. Obtención de energía eléctrica por medio de una celda de combustión microbiana empleando plantas acuáticas. *0*, 2020.
- [14] L Hincapié. Desarrollo de una celda de combustible microbiana (ccm) para la aplicación en tratamiento de aguas residuales. *CENTRO*, 2014.
- [15] Ioannis A Ieropoulos and Daniela Zertuche Moreno. Microbial fuel cells powering robots and beyond; historical perspective and future directions. *Bioelectrochemistry*, 166:109010, 2025.
- [16] Camila Jandete Arellano. Tula: La otra cara del agua. The Coalition for Human Rights in Development, abril 2025. Accedido el 21 de mayo de 2026.
- [17] Adolf Krige. *Microbial fuel cells, applications and biofilm characterization*. PhD thesis, Luleå University of Technology, 2019.

-
- [18] A Larrosa-Guerrero, K Scott, IM Head, F Mateo, A Ginesta, and C Godinez. Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel*, 89(12):3985–3994, 2010.
- [19] Bruce E. Logan, Bert Hamelers, Rene Rozendal, Uwe Schröder, Jurg Keller, Stefano Freguia, Peter Aelterman, Willy Verstraete, and Korneel Rabaey. Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Nature Reviews Microbiology*, 4(7):403–415, 2006.
- [20] J López. Desarrollo de una celda de combustible microbiana (ccm) para aplicación en tratamiento de aguas residuales. *Repositorio institucional Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, México*, 2014.
- [21] Tatiana Mañunga. Evaluación del desempeño de un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto sin clarificación primaria tratando agua residual doméstica. *0*, 2014.
- [22] M Martínez, C Octaviano, O Araiza, and R Ruiz. Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (gy cei) del sector aguas residuales de México. *Mitigación del cambio climático*, 194, 2018.
- [23] Metcalf and Eddy. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. MacGraw-Hill, 1995.
- [24] Metcalf & Eddy, Inc., George Tchobanoglous, H. David Stensel, Ryujiro Tsuchihashi, and Franklin L. Burton. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education, New York, 5th edition, 2014.
- [25] Ana M Montiel, Erika Méndez, Francisco J Rodríguez-Valadez, and Miguel A González-Fuentes. Las bacterias también son útiles.¿ que es una celda de combustible microbiana? *RD-ICUAP*, pages 77–88, 2023.
- [26] Jamile Mohammadi Moradian, Zhen Fang, and Yang-Chun Yong. Recent advances on biomass-fueled microbial fuel cell. *Bioresources and bioprocessing*, 8(1):14, 2021.
- [27] Mustakeem. Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(4):22, 2015.

-
- [28] KeChrist Obileke, Helen Onyeaka, Edson L Meyer, and Nwabunwanne Nwokolo. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125:107003, 2021.
- [29] Korneel Rabaey and Willy Verstraete. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnology*, 23(6):291–298, 2005.
- [30] Mostafa Rahimnejad, Ali Asghar Ghoreyshi, Ghasem Najafpour, and Tahereh Jafary. Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations. *Applied Energy*, 88(11):3999–4004, 2011.
- [31] Juan José Redondo Iriarte et al. Microorganismos electrogénicos: células de combustible microbianas. *0*, 2018.
- [32] Alejandro Reyes. En Hidalgo hay 188 plantas tratadoras de aguas inoperantes por falta de recursos. *El Sol de Hidalgo*, Diciembre 2024. Consultado el 12 de marzo de 2026.
- [33] Sebastián Reyes Flores. Sistema iot para el monitoreo de un reactor biológico tubular. *0*, 2022.
- [34] Rolando Reyes Huamán. Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales de la industria de cacao mediante celdas de combustible microbiana. *0*, 2023.
- [35] María Fernanda Romero Ramayo. Determinación de la función de transferencia de una celda de combustible microbiana. B.S. thesis, Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería, 2019.
- [36] MJ Salar-García, VM Ortiz-Martínez, Antonia Pérez de los Ríos, FJ Hernández-Fernández, S Sánchez-Segado, and LJ Lozano-Blanco. Pilas de combustible microbianas: Factores clave para su diseño. *DYNA: Energía y Sostenibilidad*, 3(1), 2014.
- [37] María Fernanda Santacruz Burbano and Brandon Damián Cerón Rojas. Filtro anaerobio de lecho granular ascendente para el tratamiento de aguas residuales urbanas falg 2. *0*, 2001.
- [38] Janaina S Santos, Mostafa Tarek, Mariana S Sikora, Supareak Prasertthdam, and Pi-yasan Prasertthdam. Anodized tio2 nanotubes arrays as microbial fuel cell (mfc) electrodes for wastewater treatment: an overview. *Journal of power sources*, 564:232872, 2023.

-
- [39] Meshack I. Simeon, Felix U. Asoiro, Mohamad Aliyu, Olayinka A. Raji, and Ruth Freitag. Polarization and power density trends of a soil-based microbial fuel cell treated with human urine. *International Journal of Energy Research*, 44(7):5968–5976, 2020.
- [40] Universidad Nacional de La Plata. Clase 10: Electricidad. ley de ohm - potencia y energía eléctrica. Escuela Universitaria de Oficios, Prosecretaría de Políticas Sociales, 2020. Material didáctico de la Secretaría de Extensión Universitaria.
- [41] Miriam Vega Loyola. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Reporte de proyecto académico, Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México (TESOEM), Subdirección Académica, Ingeniería Ambiental, Edo. México, México, Marzo 2010.
- [42] Luisa Valeria Vidal Morales and Laura Daniela Zambrano Barón. Desempeño de un sistema de celdas de combustible microbiano para el tratamiento y generación de bioelectricidad a partir de efluentes de una industria de curtiembre ubicada en el municipio de villapinzón, cundinamarca. *0*, 2021.
- [43] Ruikai Zhang, Wentao Dai, Hongyong Xiang, Jie Chen, Ting Yi, Jiayi Li, Jiebin Zhang, Qiuxi Yang, Rui Xiao, and Xiang Li. Characteristics and driving factors of power generation performance in microbial fuel cells: an analysis based on the cnki database. *Frontiers in Microbiology*, 16:1620539, 2025.