TRABAJO DE GRADO
Opción Investigación o Proyecto de Grado

Diseño, análisis y fabricación de un reactor metanogénico en una celda de combustible microbiana.

Corporación Universitaria Remington.

Facultad de ingeniería.

Ingeniería Ambiental.

Naraly Dannela Alfonso Menoyos.

Juan Esteban Vélez Álvarez.

Opción en la que realizó su trabajo de grado (Investigación o Proyecto de grado).

2025.

Resumen

En este trabajo de grado se aborda la fabricación, diseño y análisis de un prototipo de reactor metanogénico acoplado a una celda de combustible microbiana (CCM), así como la implementación del análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) mediante el método de titulación. El objetivo principal de esta investigación es optimizar la generación de energía a partir de aguas residuales, utilizando procesos de biodegradación anaeróbica combinados con la conversión electroquímica para la producción de biogás metano. Este estudio se centra en evaluar la eficiencia del sistema experimental, considerando tanto el desempeño de la celda de combustible microbiana en la producción de biogás metano, como la precisión y confiabilidad del análisis de la DQO como indicador de la calidad del tratamiento de aguas. Los resultados obtenidos permitirán analizar la eficiencia del prototipo desarrollado y evaluar la viabilidad de implementar esta tecnología en aplicaciones de generación de energía sostenible y tratamiento de aguas residuales..

Palabras clave

Reactor metanogénico, Celda de combustible microbiana (CCM), Demanda química de oxígeno (DQO), Biogás, Energía renovable.

Tabla de Contenidos

Resumen i

Lista de figuras v

Lista de tablas vii

Introducción 1

1. Marco teórico y estado del arte 3

1.0.1. Celdas Microbianas 3

2. Planteamiento del problema 7

3. Justificación 9

4. Objetivos 11

4.0.1. Objetivo General 11

4.0.2. Objetivos específicos 11

5. Metodología 13

6. Resultados y discusión 17

6.0.1. Celda Microbiana 17

6.0.2. Modelo estadístico 20

6.0.3. Lotka-Volterra 23

6.0.4. Demanda química de oxígeno (DQO) 26

7. Conclusiones 29

Referencias 31

Lista de figuras

5.1. Montaje del sistema de electrodos 14
5.2. Montaje experimental para toma de datos en tiempo real junto con la celda de combustible microbiana 15
5.3. Diagrama del protocolo de DQO desarrollado 16
6.1. Celda empleada para los montajes experimentales 18
6.2. Comparación de potencial eléctrico y concentración de metano 19
6.3. Gráfico de dispersión: Relación de potencial eléctrico de celda respecto de la concentración de metano 20
6.4. Modelo Lotka-Volterra para predicción de la densidad de corriente y concentración de metano en el tiempo 25
6.5. Curva de densidad de corriente y concentración de CH_4 en el tiempo 25

Lista de tablas

6.1. Resultados de regresión OLS (Mínimos Cuadrados Ordinarios.) 21

Introducción

La creciente crisis ambiental ha impulsado el desarrollo de tecnologías sostenibles para la generación de energía y el tratamiento eficiente de aguas residuales. El aumento de la población, la rápida urbanización y la gran presión que hay sobre los recursos del agua ha impulsado a la búsqueda de alternativas como las tecnologías emergentes que con una doble funcionalidad permitan la remediación de contaminantes y la generación de energía limpia. Entre las soluciones emergentes se encuentra Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) las cuales se destacan como una tecnología emergente con un gran potencial para el desempeño de esta doble función [1][2]. Las Celdas de Combustible Microbiana (CCM) son dispositivos biolectroquimicos los cuales utilizan microorganismos electrogénicos para la descomposición de la materia orgánica en ambientes anaerobios, generando corriente eléctrica en el proceso [3][4]. Este sistema transforma los residuos orgánicos, como los que están presentes en las aguas residuales generados por diferentes industrias, en recursos energéticos. La eficiencia de este proceso incrementa mediante la integración de un reactor metanogénico el cual permitirá capturar y utilizar el metano como un subproducto energético, potenciando así a la recuperación energética global del sistema[5][6].

La metanogénesis, es el proceso final en la digestión anaeróbica, este es llevado acabo por arqueas metanogénicas la cuales son capaces de convertir productos intermedios (acetato, hidrogeno, CO2) en metano[7]. El gas metano puede ser empleado directamente como un biocombustible, generando una mejora en la sostenibilidad del sistema. Diferentes investigaciones han demostrado que la convivencia de diversas comunidades microbianas favorece la estabilidad de estos sistemas, y que su dinámica pueden ser explicadas mediante modelos matemáticos como los de Lotka-Volterra o Gompertz, en la presente investigación el modelo matemático utilizado fue el Lotka-Volterra competitivo, el cual es una versión donde se tiene en cuenta el antagonismo entre especies[8][9].

La eficacia del tratamiento de las aguas residuales pueden ser valorado a través de indicadores como la Demanda Química de Oxigeno (DQO), la cual determina el volumen de materia orgánica presente en el agua residual. El método de la Demanda Química de Oxigeno (DQO) por titulación respaldado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), posibilita un control exacto del sistema en tiempo real[10]. Este estudio es de manera crucial para así poder establecer vínculos entre la carga orgánica tratada, la actividad de los microorganismos y la producción de energía, transformándose en una herramienta clave para el funcionamiento del reactor. Investigaciones actuales han sugerido estructuras híbridas de CCM vinculadas a digestores anaerobios, demostrando incrementos notables en la eficiencia energética y en la degradación de compuestos resistentes[11]. Además, se ha evidenciado que la incorporación de electrodos modificados y la aplicación de mediadores redox pueden impulsar la transferencia de electrones en el sistema, aumentando la generación de corriente[12][13].

El propósito de este estudio es diseñar, analizar y fabricar un reactor metanogénico acoplado a una celda de combustible microbiana, con el fin de evaluar su viabilidad como sistema híbrido para la generación de energía renovable y el tratamiento de aguas residuales. La evaluación incluye la caracterización energética a partir de la producción de metano y corriente eléctrica, así como el seguimiento de la remoción de materia orgánica mediante el análisis de DQO por titulación. Este enfoque propone una solución innovadora, reproducible y económicamente asequible en su construcción, producción e implementación, alineada con el desarrollo sostenible, y brinda soluciones en saneamiento básico, energías limpias de bajo costo y estrategias de mitigación climática.

1. Marco teórico y estado del arte

La necesidad de sistemas sustentables para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía ha fomentado la creación de tecnologías híbridas que combinan procesos biológicos y electroquímicos. En este escenario, la celda de combustible microbiana (CCM) se presenta como una solución revolucionaria al facilitar la transformación directa de materia orgánica en energía eléctrica, con la ayuda de comunidades microbianas especializadas [1].

1.0.1. Celdas Microbianas

El reactor metanogénico incorporado en la CCM desempeña un rol crucial en la mejora del sistema, facilitando la degradación anaerobia de sustancias orgánicas y la generación de biogás, que se compone principalmente de metano, este procedimiento ayuda a incrementar la eficacia total del sistema y disminuir la acumulación de desechos orgánicos [3].

Las CCM son dispositivos bioelectroquímicos que convierten la energía química almacenada en compuestos orgánicos en energía eléctrica, mediante el metabolismo de microorganismos electrogénicos [4][14]. En estos sistemas, durante la oxidación de sustratos orgánicos, los electrones liberados son trasladados desde el ánodo al cátodo mediante un circuito externo, creando así una corriente eléctrica. A nivel del ánodo, bacterias como *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis* han demostrado ser particularmente eficientes en la transferencia extracelular de electrones [15][16]. No obstante, uno de los desafíos mas significativos de las CCM es la administración de los residuos en proceso, que incluyen compuestos intermedios que podrían reducir la actividad de los microorganismos si no se transforma de manera eficientemente. La metanogénesis es un proceso clave dentro de la digestión anaerobia, en el cual las arqueas metanogénicas convierten compuestos como acetato, dióxido de carbono e hidrógeno en metano (CH_4) [17], principalmente, estas arqueas se clasifican en dos categorías: las acetoclásticas (como *Methanosarcina* y *Methanotrix*) que emplean acetato, y las hidrogeno tróficas, que emplean H_2 y CO_2 [18] [19]. La integración de un reactor metanogénico en la CCM permite una sinergia entre la generación eléctrica y la producción de biogás, elevando la eficiencia energética del sistema completo [20].

Investigaciones actuales enfatizan que la unión de reactores metanogénicos con sistemas electroquímicos no solo aumenta la generación de energía, sino que también potencia la calidad

del efluente tratado y estabiliza los parámetros de operación [21] [22]. En el artículo ”Partial Methane Oxidation in Fuel Cell-Type Reactors for Co-Generation of Energy and Chemicals” se discute una variante interesante: la oxidación parcial del metano (POM) en reactores tipo celda de combustible[23].

La evaluación de la DQO resulta crucial para determinar la carga contaminante de los desechos tratados en el reactor [24]. Esta metodologia busca utilizar el metano no unicamente como recursos energético, si no que también como un insumo para la producción de sustancias químicas intermedias como el metanol o el formaldehído, a través de reacciones reguladas. En este punto, la metanogénesis anaeróbica emerge como una opción adicional para hacer el aprovechamiento de estos intermediarios y convertirlos en metano, un gran recurso energético de gran valor metanogénico y la CCM [25]. Este método fusiona la función catalítica y electroquímica del sistema, enfocándose en una valoración más completa del metano. Esto brindaría un doble reto para el medio ambiente: por un lado, es una fuente de energía renovable; por otro, es un potente gas de efecto invernadero si no se captura de manera apropiada.

Estudios actuales sobre reactores metanogénicos acoplados a CCM han constatado una mejora de ciertamente significativa con respecto a la eficiencia energética total del sistema. Investigaciones como la de (Kadier et al., 2016) y (Wang et al., 2024) han registrado la viabilidad de estos sistemas en condiciones tanto de laboratorio como en escala piloto[2][26].La metanogénesis es un proceso de respiración anaerobia realizado por arqueas metanógenas que, en ausencia de oxígeno, convierten compuestos como el dióxido de carbono, el hidrógeno y el acetato en metano[27]. Este fenómeno juega un papel fundamental en la degradación final de la materia orgánica en entornos como pantanos, vertederos, etc. Además de sus implicaciones ecológicas debido a la emisión de metano, el cual es un potente gas de efecto invernadero, la metanogénesis también presenta aplicaciones en la producción de biogás y en el tratamiento de residuos[28]. Desde una perspectiva ecológica y dinámica, se puede analizar la interacción entre las metanógenas y otros grupos microbianos que generan sus sustratos a través del modelo de Lotka-Volterra, que describe relaciones de competencia, depredación o mutualismo [29]. En este contexto, es posible modelar la coexistencia o competencia entre los fermentadores que producen el gas metano, lo que revela cómo las poblaciones se autorregulan y se estabiliza el ecosistema microbiano anaerobio. En el presente trabajo Los datos experimentales obtenidos fueron recopilados y analizados mediante técnicas de estadística descriptiva e inferencial. Para evaluar

la relación entre la generación de potencial eléctrico y la producción de gas metano, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman, el cual permite determinar la existencia y la intensidad de la relación que tendría la generación de gas metano y el potencial eléctrico entre dos variables no necesariamente lineales. También se utilizó el modelo Lotka-Volterra el cual nos ayuda a entender, predecir y optimizar las interacciones microbianas que afectan directamente la producción de metano y la generación de potencial eléctrico en la celda.

El enfoque del estudio es en el diseño, construcción y fabricación de una celda de combustible microbiana de bajo costo y desarrollada bajo la premisa de desarrollar cualquier instrumento necesario para la medición de los parámetros característicos de esta, tales como densidad de corriente eléctrica, concentración de metano y valoración de la demanda química de oxígeno (DQO). [30] [31].

Planteamiento del problema

El aumento en la producción de desechos orgánicos y la demanda de energías renovables han fomentado el estudio de tecnologías de bioenergía. Las Celdas de Combustible Microbianas han probado ser una opción factible para transformar residuos en energía eléctrica, aunque su eficacia todavía necesita mejoras. Uno de los retos más significativos es el incremento en la producción de biogás y la exigencia de optimizar el desempeño del sistema. El presente análisis respalda su importancia al enfrentar estos retos a través de la incorporación de un reactor metanogénico el cual permite aprovechar de manera eficiente el potencial energético de las aguas residuales. Igualmente, la aplicación de la DQO mediante titulación ofrece un control exacto sobre la eficacia del sistema, respecto al tratamiento de aguas residuales lo que hace mas atractivo su uso en contextos industriales y municipales.

Justificación

El deterioro ambiental, el agotamiento de los recursos fósiles y el incremento sostenido de los niveles de contaminación hídrica exigen soluciones tecnológicas que sean sostenibles, eficientes y económicamente escalables. En este contexto, la producción hacia modelos energéticos de energía renovable de fuentes no tradicionales y la creciente necesidad de de una mejora para la gestión del tratamiento de aguas residuales, se considera como problemas importantes para la integración y búsquedas del desarrollo de tecnologías ambientales para mejorar del sector del tratamiento de aguas residuales. Este proyecto no solo identifica estas prioridades, sino que también genera una propuesta concreta a través de una metodología que tiene como estructura tres etapas: conceptualización, técnicas, evaluación de viabilidad y realización de prototipos funcionales de la celda de combustible microbiana (CCM) con el reactor metanogénico, los cuales brinda una solución con un doble propósito: generación de energía limpia y tratamiento de los efluentes orgánicos en las aguas residuales.

Esta investigación radica en diversos factores de orden ambiental, científicos, tecnológicos y económicos. Actualmente para el tratamiento de aguas residuales hay tecnologías tradicionales , como lo son los sistemas activados o los digestores anaerobios convencionales, pero estos presentan ciertas limitaciones con respecto a la eficiencia energética, consumo de recursos y el requerimiento de grandes espacios. Uno de los problemas recurrente en estas metodologías es la poca capacidad para extraer el máximo rendimiento energético de los desechos, dejando sin explotar materias primas críticas que, mediante procesos adecuados, podrían suministrar a las redes eléctricas o sistemas térmicos. Este enfoque limitado no solo reduce su impacto ambiental positivo, sino que incrementa indirectamente la dependencia de combustibles convencionales. Las celdas de combustible microbiana (CCM)son una innovadora alternativa en el campo de la bioenergía, ya que permiten convertir de manera directa la energía química contenida en la materia orgánica de las aguas residuales en electricidad. Este proceso se lleva a cabo mediante reacciones bioelectroquímicas que son catalizadas por microorganismos[32][33]. Este proceso no solo depura el agua al reducir la demanda química de oxígeno (DQO), sino que produce densidades de corriente eléctrica comercialmente útiles [32], la cual estaría siendo una tecnología dual para el tratamiento y la generación de energía pero con limitaciones. Al incorporar un reactor metanogénico en el sistema, el ciclo de uso de recursos esta optimizado. Las bacterias electro activas en la CCM se encargan de oxidar compuestos orgánicos para generar electrones libres[34],

y al mismo tiempo los microorganismos metanogénicos generan metano el cual puede ser también aprovechado[33]. El reactor metanogénico propuesto maximiza la recuperación energética al extraer tanto la electricidad como un combustible gaseoso a partir de un mismo sustrato, logrando una gran una mayor eficiencia que superarían las tecnologías actuales y convencionales[35]. El presente proyecto contribuye un gran aporte al avance de sistemas bioelectroquímicos, donde se fusiona la ciencia de la microbiología, electroquímica, dinámica de sistemas biológicos y la ingeniería ambiental.

Objetivos

4.0.1. Objetivo General

Diseñar y fabricar una celda de combustible microbiana destinada al tratamiento de aguas residuales, así como evaluar su capacidad para la generación de energía.

4.0.2. Objetivos específicos

- Modelar una celda de combustible microbiana en 3D con el fin de optimizar la reacción de electrogénesis.
- Integrar un medidor de metano en la celda de combustible microbiana para analizar la producción energética en términos de la generación de este biogás.
- Caracterizar el agua residual antes y después del proceso en el bioreactor, para estimar su capacidad de remoción de materia orgánica (DQO).
- Desarrollar una plataforma de hardware y software adecuada para la recolección de datos sobre la concentración de metano y la densidad de corriente eléctrica.

Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, orientado al diseño y validación de un sistema híbrido para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía, se llevaron a cabo diversas etapas clave. Estas comprenden desde el diseño del sistema hasta la implementación del reactor metanogénico y la estandarización del análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) mediante el método de titulación, con el fin de medir variables fisicoquímicas y bioeléctricas bajo condiciones controladas en laboratorio. El procedimiento se divide en las siguientes fases:

1. Diseño del prototipo: Se realizó un modelado tridimensional de la celda de combustible microbiana (CCM) y del reactor metanogénico, definiendo sus dimensiones, materiales y puntos de integración. La celda fue fabricada mediante impresión 3D. Para el ánodo y el cátodo se emplearon láminas de grafito, las cuales contaban con un alambre de acero inoxidable que permitía la conexión al sistema de adquisición de datos, con el fin de medir el potencial eléctrico generado por la celda. Para la membrana semipermeable se empleó Nafion™, un material selectivo a los iones H^+. Los tres elementos —ánodo, cátodo y membrana polimérica— se integraron mediante la aplicación de presión constante y temperatura (105 ◦C) como se muestra en la figura 5.1.

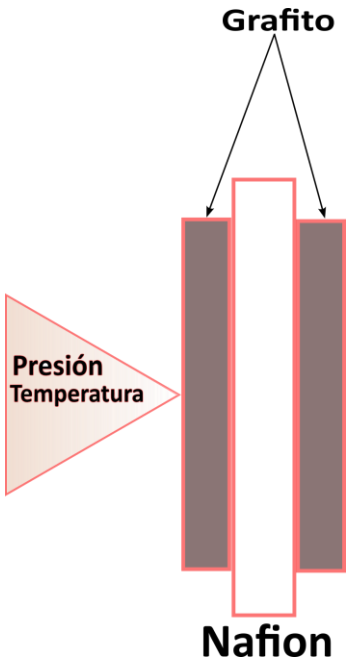

Figura 5.1: Montaje del sistema de electrodos

2. Esquema de conexiones del montaje electrónico: Para realizar la medición del rendimiento de la celda de combustible microbiana (CCM), se diseñó un sistema de conexiones eléctricas. Este montaje incluye un sensor de gas metano MQ-4, ubicado en la parte superior de la celda, encargado de detectar la concentración de metano acumulado. La señal generada por el sensor es amplificada mediante un amplificador operacional (OpAmp) en configuración no inversora, con el fin de evitar interferencias en la medición, es decir, minimizar fugas de corriente que podrían afectar los valores de voltaje en circuito abierto. Posteriormente, la señal amplificada es enviada a un microcontrolador Raspberry Pi Pico, que recibe los datos a través de sus entradas analógicas y los transmite vía conexión USB a un sistema de registro desarrollado en Python, alojado en un PC. Este sistema fue diseñado específicamente para recolectar los datos provenientes de los sensores. El montaje permite así el monitoreo en tiempo real tanto de la concentración de metano como del potencial eléctrico, como se mostrará más adelante. Cabe resaltar, que el sensor de metano fue

calibrado de manera específica para la detección de Metano, dado que no es específico para este gas en particular.

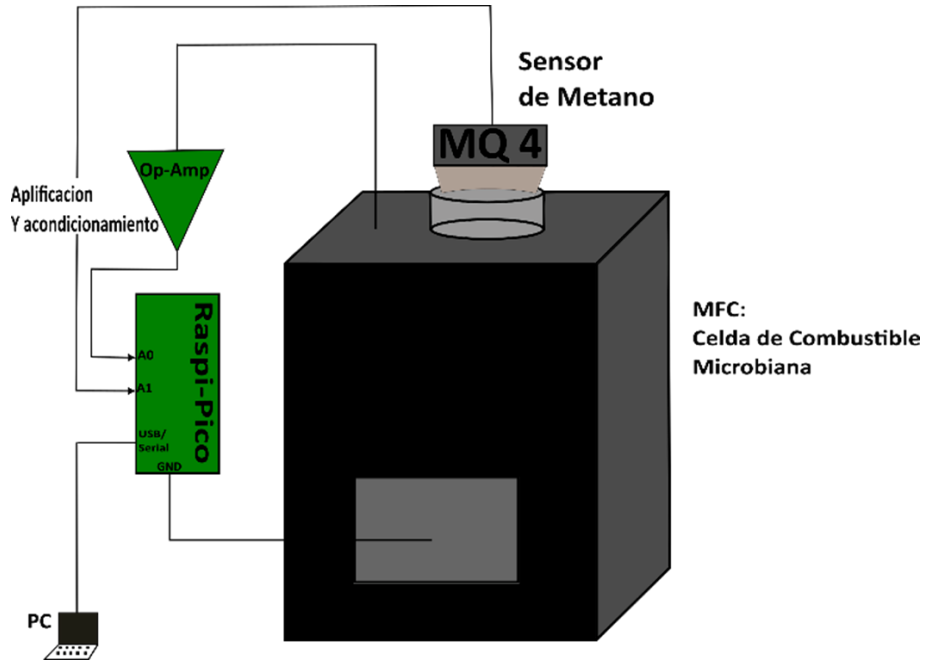

Figura 5.2: Montaje experimental para toma de datos en tiempo real junto con la celda de combustible microbiana

3. Determinación de la Demanda Química de Oxigeno (DQO): Con el objetivo de implementar de manera efectiva el análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se llevaron a cabo múltiples ensayos experimentales durante un periodo de un mes. En estos ensayos se probaron diversos protocolos estandarizados, incluyendo el método EPA 410.1 [10]; sin embargo, ninguno de ellos produjo resultados satisfactorios o coherentes con los parámetros esperados. Ante esta situación, y basados en un análisis crítico de los errores observados durante la aplicación de los protocolos fallidos, se tomó la decisión de diseñar y adaptar un protocolo propio. Esta nueva metodología incorporó modificaciones específicas en la dosificación de los reactivos, con el fin de optimizar la reacción química y mejorar la reproducibilidad de los resultados. El protocolo de estandarización desarrol lado para la determinación de la DQO se encuentra detallado en la figura 5.3 que acompaña esta sección.

4. Monitoreo de Variables Fisicoquímicas y Bioeléctricas: Se llevaron acabo 3 diferentes mediciones experimentales para ver la generación del biogás metano y la producción del potencial eléctrico, lo cuales son fundamentales para evaluar la eficiencia y rendimiento del prototipo diseñado de la celda de combustible microbiana. Esto se realizó bajo condiciones controladas en el laboratorio para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

5. Diseño del protocolo de estandarización DQO: Para este seguimos el protocolo que se encuentra en la figura 5.3 la cual es el protocolo diseñado y adaptado tras la falla de protocolos anteriores como el del EPA 410.1 [10], aunque finalmente no pudo ser implementado debido a fallas presentadas en la preparación del Amonio Ferroso ($FeH_8N_2O_8S_2$) (Poca solubilidad al solvente debido a la calidad del agua destilada). El método inicia con la preparación de una solución la cual es oxidante mediante la mezcla de 11.75g de y 5ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), llevados a 250ml de agua destilada; esta solución proporciona el agente oxidante necesario para la materia orgánica. Después de esto en un elernmeyer, se combinan 10 ml de la muestra de agua residual con 0,4g de H_2SO_4, 5ml de $K_2Cr_2O_7$ y por ultimo también 15 ml Ag_SO_4, seguido de agitación, en el cual en el medio se genera un eficiente oxidación, en esta parte el el principal oxidante es el dicromato, y de catalizador para la degradación de los compuestos tendríamos al el sulfato de plata. Después de todo los pasos anteriores se adicionarían tres gotas de la ferroína la cual tiene como función ser un indicador redox al cambiar de color cuando finaliza la reacción, permitiendo realizar la titulación con la solución patrón, para así determinar la cantidad necesaria de oxidante consumido y por ende hacer una cuantificación de la materia orgánica presente en la muestra de agua residual.

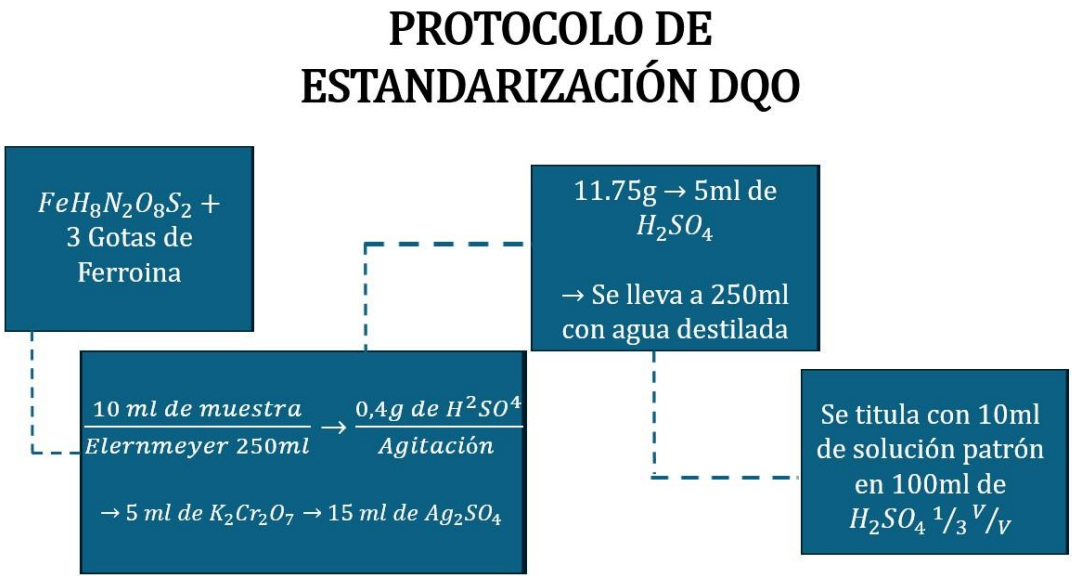

Figura 5.3: Diagrama del protocolo de DQO desarrollado

Resultados y discusión

Los experimentos realizados con la CCM, midieron potencial eléctrico, corriente eléctrica y concentración de metano, en los resultados obtenidos se pudo observar una generación constante de corriente eléctrica y una variación en las concentraciones de metano a lo largo del tiempo. Inicialmente, la celda mostró una producción moderada de corriente eléctrica, vinculada con un aumento progresivo en los niveles del metano. Sin embargo, cuando el sistema alcanzó un estado de equilibrio, la producción de metano disminuyó. El diseño e incorporación del reactor metanogénico nos permite evaluar de manera más precisa la conversión de materia orgánica y su interacción con el sistema bioelectroquímico de la celda. La actividad microbiana dentro del reactor facilita una degradación anaerobia de compuestos orgánicos, brindando un mayor rendimiento en la producción de metano.

Para complementar el análisis del sistema, se implementó la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) mediante el método de titulación, lo que permitiría realizar una cuantificación de la cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua residual.

6.0.1. Celda Microbiana

La CCM fue diseñada e impresa por medio de la impresora 3D, a esta la conforma un anodo y catodo, los cuales ambos son fabricados con el material grafito, y una membrana polimérica de nafion, estas fueron ensambladas mediante presión y temperatura. El ánodo es el electrodo en el cual los microorganismos oxidan la materia orgánica que esta presente en el agua residual , liberando electrones; el catodo es el electrodo en el que se produce la reducción [1]. La membrana polimérica de Nafion funciona como un separador selectivo que facilita el transporte de protones del ánodo al cátodo, impidiendo simultáneamente el paso directo de electrones y manteniendo los compartimentos separados para garantizar la eficiencia electroquímica [1]. La CCM tiene dos alambres los cuales uno conectado al ánodo y el otro al cátodo, estos son resistentes a la oxidación, por medio de ellos se permite la conexión al circuito para realizar la medición del potencial eléctrico que es generado. Para evitar fugas del agua residual se procedió a pintarla con una pintura la cual sea impermeable, la CCM solo tiene un orificio en la parte superior el cual es donde esta

integrado el sensor de metano MQ-4, por medio de este se realiza la detección y medición de metano, el cual también esta conectado al sistema, como se muestra en la figura 6.1.

Figura 6.1: Celda empleada para los montajes experimentales

Durante la medición a circuito abierto, esto con el fin de probar la espontaneidad termodinámica del sistema, osea, $\Delta G < 0$, o teniendo en cuenta la ecuación de Nernst[36]:

$$\Delta G = -zFE \tag{6.1}$$

Donde z es el número de electrones transferidos, F es la constante de Faraday ($96485{,}332\ \frac{C}{mol}$) y E el potencial el éctrico de la celda. Asimismo, si se tienen en cuenta los resultados obtenidos, como los mostrados en la figura 6.2, puede concluirse que la reacción es efectivamente espontánea desde el punto de vista termodinámico. Lo anterior indica que el proceso de generación eléctrica en aguas residuales industriales, como las presentadas en este estudio, tiene el potencial de

producir energía. No obstante, es necesario establecer la capacidad real de estos dispositivos para generar trabajo, lo cual se abordará más adelante al analizar la densidad de corriente eléctrica.

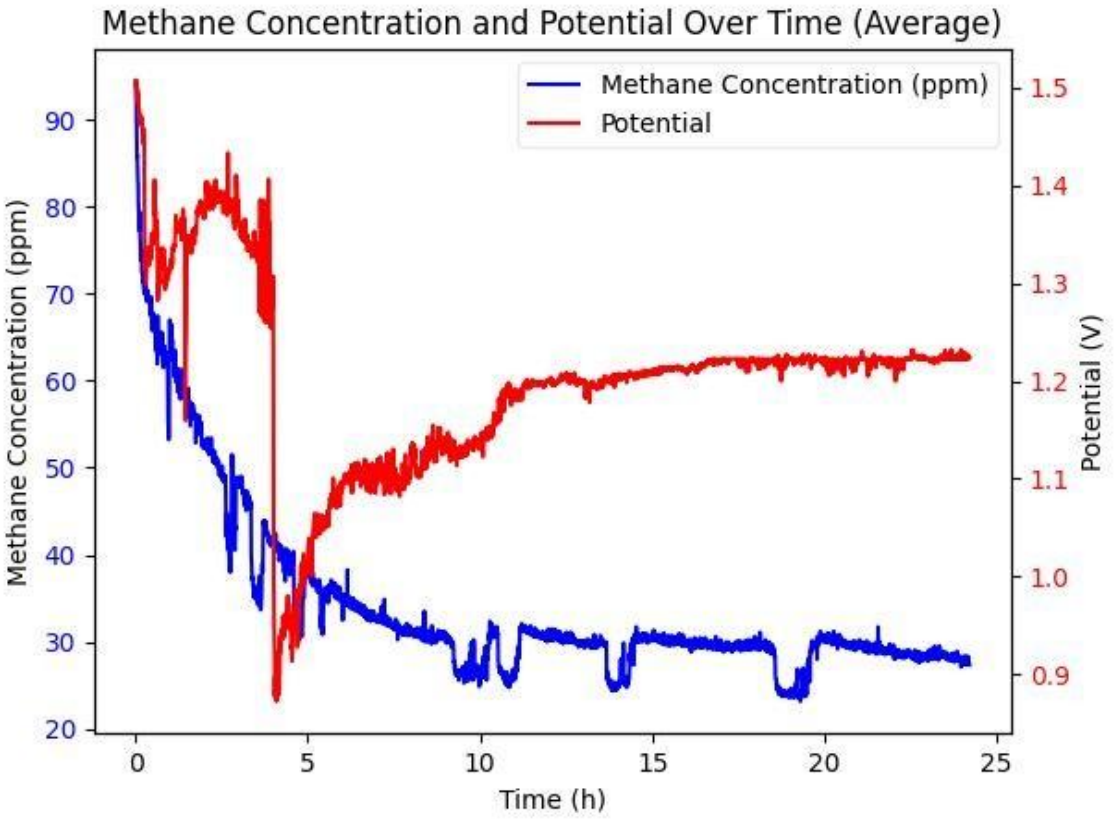

Figura 6.2: Comparación de potencial eléctrico y concentración de metano

Un aspecto importante a resaltar es la medición de la concentración de metano, dado que, tradicionalmente, las celdas de combustible microbianas presentan limitaciones en la generación de potencia eléctrica. Por ello, se explora la viabilidad de aprovechar el metano no solo como producto final, sino como un vector energético intermedio con alto potencial. A diferencia del hidrógeno, que si bien permite alcanzar altas densidades de corriente, presenta importantes desafíos en cuanto a su almacenamiento, transporte y manejo seguro debido a su baja densidad volumétrica y alta reactividad, el metano ofrece ventajas significativas. Este puede ser transportado mediante infraestructuras ya existentes, como gasoductos, y almacenado de manera más sencilla y económica. Desde una perspectiva ingenieril, el reto actual radica en desarrollar procesos sostenibles y eficientes para la conversión de metano en hidrógeno *" in-situ "*, mediante tecnologías como el reformado catalítico, procesos biológicos o reactores de reformado asistido

por plasma[37], lo que permitiría combinar la facilidad logística del metano con las propiedades electroquímicas superiores del hidrógeno[38].

6.0.2. Modelo estadístico

Del desarrollo experimental se desprende una herramienta clave para justificar la elección del modelo competitivo de Lotka-Volterra, empleado principalmente en sistemas biológicos donde existe antagonismo entre especies. Este comportamiento se observa en la figura 6.2. Dado que los experimentos se realizaron por triplicado, fue posible aplicar un enfoque estadístico para validar dicha interacción. Para ello, se utilizó un gráfico de dispersión entre la concentración de metano y el potencial eléctrico a circuito abierto, al que se le aplicó una regresión por mínimos cuadrados. Además, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson con el fin de identificar la naturaleza de la relación entre ambas variables.

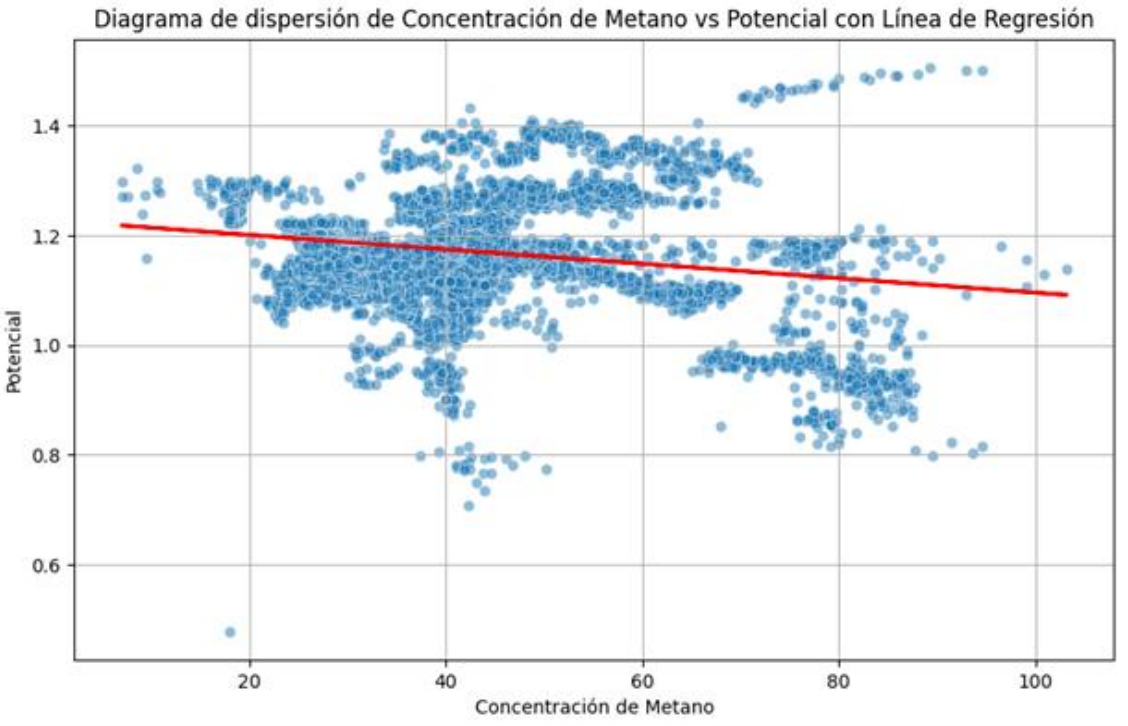

Figura 6.3: Gráfico de dispersión: Relación de potencial eléctrico de celda respecto de la concentración de metano

Tabla 6.1: Resultados de regresión OLS (Mínimos Cuadrados Ordinarios.)

Variable	**Coef.**	**Error estándar**	**t**	$P > \|t\|$	**[0.025, 0.975]**
const	1.2275	0.0030	392.275	0.000	[1.221, 1.234]
Methane	-0.0013	7.15e-05	-18.411	0.000	[-0.001, -0.001]

R-cuadrado:	0.039
R-cuadrado ajustado:	0.039
Estadístico F:	339.0
Prob(F):	$3{,}16 \times 10^{-74}$
Nº de observaciones:	8332
Grados de libertad (modelo):	1
Grados de libertad (residuos):	8330
Log-verosimilitud:	7952.7
AIC:	-15,900
BIC:	-15,890
Durbin-Watson:	0.053
Estadístico Omnibus:	429.578
Prob(Omnibus):	0.000
Jarque-Bera (JB):	1478.676
Prob(JB):	0.000
Asimetría:	-0.153
Curtosis:	5.041
Cond. número:	134

A partir de la figura 6.3 y la tabla 6.1, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

El coeficiente de Pearson, dado por $R^2 = 0{,}039$, por lo que, $r = -\sqrt{0{,}039} \approx -0{,}1975$, donde el signo negativo indica una relación inversa entre la concentración de metano y el potencial eléctrico en circuito abierto. Esto sugiere que la relación entre ambas variables es débil y decreciente.

Por otro lado, la correlación de Spearman, con un valor de $\rho = -0{,}0916$, refuerza la idea de que no se sigue un patrón lineal claro entre las variables, apuntando más bien a una posible relación monótona y no lineal.

Si bien esta tendencia no es concluyente desde el punto de vista estadístico, sí sugiere la existencia de una conexión fenomenológica débil entre el potencial eléctrico y la concentración de metano, posiblemente influenciada por factores biológicos o ambientales inherentes al sistema. Lo anteriormente expuesto concuerda con hallazgos reportados en otras investigaciones dentro del área. Por ejemplo, Ishii et al. (2008) observaron un fenómeno similar al comparar los niveles de corriente eléctrica con la generación de metano, encontrando que, a medida que esta última

aumentaba, el potencial eléctrico mostraba una caída considerable [39]. En este sentido, los resultados de este trabajo presentan una notable similitud.

Asimismo, Jung et al. (2011) mencionan que este fenómeno es más pronunciado cuando los biorreactores utilizan acetato como fuente principal de carbono, lo que podría indicar la existencia de un sustrato común tanto para microorganismos electrogénicos como metanogénicos [40]. Finalmente, Jadhav et al. (2019) demostraron que la eficiencia coulómbica en celdas de combustible microbianas se ve afectada por la presencia de metanógenos, sugiriendo que para mejorar la generación de corriente eléctrica en estos dispositivos es necesario implementar mecanismos de control sobre estos últimos [30].

Para finalizar esta sección, se presenta a continuación el código empleado para los cálculos estadísticos y los gráficos de dispersión mostrados en este apartado:

Listing 6.1: Código para calcular la correlación de Pearson y graficar la relación entre concentración de metano y potencial eléctrico

```
import pandas as pd import numpy as np import
matplotlib.pyplot as plt from scipy.stats import
pearsonr import seaborn as sns from
sklearn.linear_model import LinearRegression

# Leer archivos CSV df1 =
pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/data_2024-06-27-12:48.csv') df2 =
pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/data_2024-07-04-14:37.csv') df3 =
pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/data_2024-07-08-13:26.csv')

# Combinar conjuntos de datos en un DataFrame combined_df =
pd.concat([df1, df2, df3])

# Eliminar filas con valores faltantes combined_df =
combined_df.dropna(subset=['Methane', 'Potential'])

# Calcular coeficiente de Pearson correlation_coefficient, p_value =
pearsonr(combined_df['Methane'],
```

```
    combined_df['Potential']) print(f"Coeficiente de Correlación de
Pearson: {correlation_coefficient
    }") print(f"Valor p:
{p_value}")

# Graficar plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.scatterplot(x='Methane', y='Potential', data=combined_df,
alpha
    =0.5)

# Ajustar y graficar OLS
X = combined_df['Methane'].values.reshape(-1, 1) y =
combined_df['Potential'].values reg = LinearRegression().fit(X, y)
plt.plot(combined_df['Methane'], reg.predict(X), color='red',
linewidth
    =2)

plt.title('Diagrama de dispersión de Concentración de Metano vs
    Potencial con Línea de
Regresión') plt.xlabel('Concentración
de Metano') plt.ylabel('Potencial')
plt.grid(True) plt.show()
```

6.0.3. Lotka-Volterra

Para la descripción teórica del sistema electro-metanogénica se procedió a emplear un modelo Lotka-Volterra competitivo, para el cual se ajustaron los parámetros relacionados con los coeficientes de inhibición y capacidad de carga, mientras que para las tazas de crecimiento se emplearon datos teóricos obtenidos de la literatura [29, 8, 9]

$$\frac{dE}{dt} = r_E E \left(1 - \frac{E + \alpha_{EM} M}{K_E}\right) \tag{6.2}$$

$$\frac{dM}{dt} = r_M M \left(1 - \frac{M + \alpha_{ME} E}{K_M}\right) \tag{6.3}$$

Donde:

- E: concentración de microorganismos electrogénicos. M:
- concentración de microorganismos metanogénicos.
- r_E: tasa de crecimiento de los microorganismos electrogénicos. r_M:
- tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos.
- α_{EM}: coeficiente de inhibición de los microorganismos metanogénicos sobre los electrogénicos.
- α_{ME}: coeficiente de inhibición de los microorganismos electrogénicos sobre los metanogénicos.
- K_E: capacidad de carga para los microorganismos electrogénicos.
- K_M: capacidad de carga para los microorganismos metanogénicos.

La curva fue normalizada para permitir el uso de unidades arbitrarias en la concentración de biomasa, dado que esta también puede determinarse mediante métodos ópticos indirectos, como el OD600 [41]. Como se muestra en la figura 6.4, el modelo permite reproducir un comportamiento similar al observado en el montaje experimental previamente descrito. En particular, se aprecia una intersección alrededor de las 6 horas entre la concentración de metano y la densidad de corriente eléctrica generada. Comparativamente, los datos experimentales muestran una cinética similar, aunque con una intersección que ocurre aproximadamente a las 1.5 horas. Esta discrepancia podría atribuirse a factores como la precolonización del electrodo o a variaciones en las poblaciones microbianas de ambos tipos de microorganismos. Como es habitual en sistemas biológicos, estandarizar las condiciones de crecimiento para una especie específica

resulta complejo, por lo que no sorprende observar esta variabilidad. Este fenómeno puede explicarse por la presencia de diversas especies tanto electrogénicas como metanogénicas.

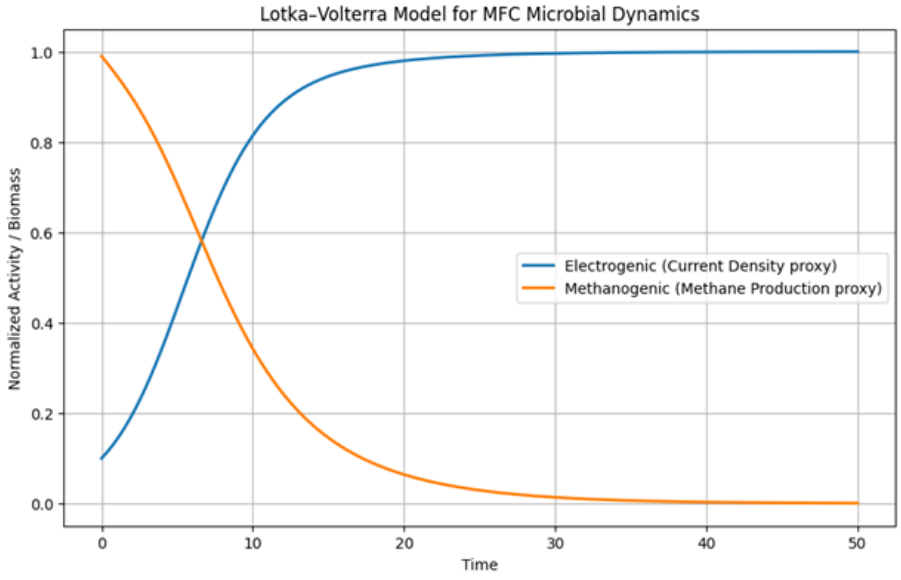

Figura 6.4: Modelo Lotka-Volterra para predicción de la densidad de corriente y concentración de metano en el tiempo

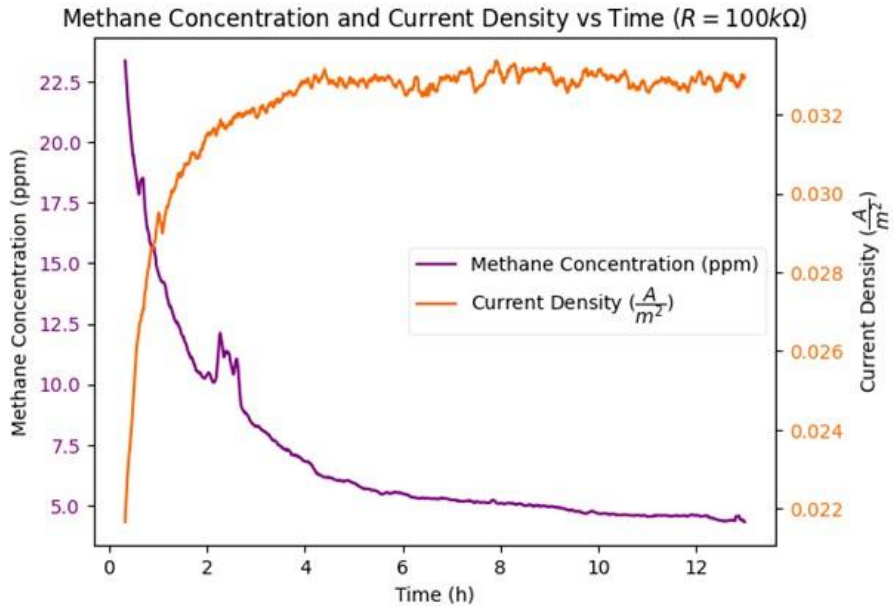

Figura 6.5: Curva de densidad de corriente y concentración de CH_4 en el tiempo

La figura 6.5 ilustra claramente este fenómeno, ya que el comportamiento temporal de la densidad de corriente eléctrica y de la concentración de metano sigue un patrón Gompertziano, característico de sistemas biológicos. Cabe destacar que el efecto sobre la población metanogénica es inverso al observado en la producción de corriente eléctrica. Esta diferencia puede explicarse

por la susceptibilidad al oxígeno, dado que los microorganismos metanogénicos son estrictamente anaerobios, mientras que los electrogénicos pueden ser facultativos. En otras palabras, el comportamiento observado podría deberse a filtraciones de oxígeno dentro de la celda de combustible[42, 43].

6.0.4. Demanda química de oxigeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, para su determinación, se emplea una reacción química en la que un agente oxidante fuerte, como el dicromato de potasio ($KCrO$), seguido de un proceso de valoración (titulación) o medición colorimétrica. La ecuación química general es :

$$M.O + CrO + HCO + HO + Cr \tag{6.4}$$

[1] Para el análisis, se utilizó una ecuación matemática basada en la diferencia entre el volumen de titulante usado en una muestra blanco (A) y en la muestra problema (B), multiplicado por la normalidad del titulante (C) y por factores constantes:

$$COD = \frac{[(A - B)C * 800] * 1{,}2}{Sustanciasimple} \tag{6.5}$$

Como resultado y al remplazar en la ecuación se obtuvo el siguiente resultado:

$$COD = \frac{[(7{,}3 - 5)0{,}39 * 800] * 1{,}2}{10} = 861{,}12 mg/l \tag{6.6}$$

No obstante, del presente análisis no se pudieron obtener resultados válidos, dado que durante la preparación del reactivo de sulfato de amonio ferroso (indispensable para la titulación) se identificaron inconsistencias vinculadas a la baja calidad del agua destilada utilizada. Esta situación impactó negativamente el proceso ya que no se pudo realizar con el agua residual, si se realizaba con este reactivo el cual no cumplía los estándares fisicoquímicos que se buscaban el

[1] M.O: Materia orgánica

procedimiento no iba a ser para nada preciso, dificultando una correcta cuantificación de la DQO, a pesar de que se había desarrollado un protocolo que contemplaba tanto la reacción química como la medición a través de titulación o colorimetría. Es importante destacar que los datos previos para validar la ecuación 6.5 se obtuvieron mediante ensayos con agua limpia, y no con agua residual, con el propósito de establecer una línea base comparativa para los cálculos.

Conclusiones

La construcción e integración de un reactor metanogénico con una Celda de Combustible Microbiana (CCM) se presenta como una solución viable para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía renovable. La eficiencia del sistema permite obtener simultáneamente electricidad y biogás a partir de un mismo sustrato, donde los microorganismos involucrados desempeñan un papel crucial en el desempeño global del proceso.

Si bien los resultados sugieren una relación inversamente proporcional entre la producción de metano y el potencial eléctrico, se observa una generación constante de corriente eléctrica junto con una capacidad efectiva de monitoreo en tiempo real de la concentración de metano. Esto sugiere que el metano puede ser reaprovechado como fuente de energía mediante la metodología propuesta, consolidando así una estrategia integrada y sustentable para el aprovechamiento de residuos orgánicos.

A diferencia de otros trabajos, en los que el objetivo principal era promover la generación eléctrica en el perjuicio de la producción de biogás, en el presente estudio se plantea que el metano podría representar el bioproducto de mayor valor agregado, dada su potencialidad para la generación de energía. En el contexto del tratamiento de aguas residuales, una estrategia adecuada consistiría en buscar un equilibrio entre ambos procesos, con el fin de reducir los costos asociados al tratamiento de estos efluentes y aumentar la eficiencia global del sistema mediante la obtención de subproductos de alto valor agregado.

Es fundamental destacar que la producción de hidrógeno a partir de metano representa una alternativa prometedora como fuente de energía limpia. No obstante, esta tecnología enfrenta desafíos significativos. Actualmente, su implementación conlleva un elevado consumo energético y requiere condiciones operativas muy específicas, lo que la posiciona como un área en desarrollo que necesita mejoras constantes. Este panorama subraya la importancia de impulsar la investigación aplicada y el desarrollo de prototipos funcionales que no solo demuestren su viabilidad técnica, sino que también aseguren eficiencia, sostenibilidad y accesibilidad a medio y largo plazo. Es esencial que estos estudios se lleven a cabo con un enfoque sistémico, considerando el contexto ambiental, económico y social en el que se desea implementar esta tecnología.

En el contexto de este proyecto, la implementación del método de Demanda Química de Oxígeno (DQO) a través de análisis de titulación tenía como objetivo evaluar el rendimiento del sistema propuesto, particularmente en lo que respecta a la degradación de materia orgánica y la posible generación de biogás. Aunque durante la fase experimental se presentaron algunas limitaciones técnicas, como inconvenientes con la calidad del agua destilada y la preparación del reactivo sulfato de amonio ferroso, estas dificultades no disminuyen el valor del enfoque metodológico adoptado. Por el contrario, enfatiza la relevancia de los aspectos operativos para obtener datos confiables y refuerzan la idea de que cada proceso experimental también es una valiosa fuente de aprendizaje. Cuando se aplica de manera adecuada, la metodología de la DQO se convierte en una herramienta sólida y confiable para el monitoreo de sistemas de tratamiento de aguas y procesos bioquímicos.

Este trabajo, propone soluciones sostenibles tanto en el campo de las aguas residuales como en el aprovechamiento energético, dando un aporte significativo a la gestión de la calidad del agua y recursos hídricos y también a las tecnologías renovables. Ademas se puede notar como la ciencia aplicada, incluso con errores o contratiempos, sigue siendo un gran camino para el desarrollo de soluciones reales para los retos actuales de medio ambiente.

Referencias

[1] B. E. Logan, *Microbial fuel cells*. John Wiley & Sons, 2008.

[2] A. Kadier, M. S. Kalil, P. Abdeshahian, K. Chandrasekhar, A. Mohamed, N. F. Azman, W. Logroño, Y. Simayi, and A. A. Hamid, "Recent advances and emerging challenges in microbial electrolysis cells (mecs) for microbial production of hydrogen and value-added chemicals," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 501–525, 2016.

[3] S. Bajracharya, "Microbial fuel cell coupled with anaerobic treatment processes for wastewater treatment," in *Integrated microbial fuel cells for wastewater treatment*. Elsevier, 2020, pp. 295–311.

[4] K. Rabaey and W. Verstraete, "Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation," *TRENDS in Biotechnology*, vol. 23, no. 6, pp. 291–298, 2005.

[5] M. Vítězová, A. Kohoutová, T. Vítěz, N. Hanišáková, and I. Kushkevych, "Methanogenic microorganisms in industrial wastewater anaerobic treatment," *Processes*, vol. 8, no. 12, p. 1546, 2020.

[6] J. M. Kurth, H. J. Op den Camp, and C. U. Welte, "Several ways one goal—methanogenesis from unconventional substrates," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 104, no. 16, pp. 6839–6854, 2020.

[7] A. A. Rastegari, A. N. Yadav, and N. Yadav, *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: trends of microbial biotechnology for sustainable agriculture and biomedicine systems: diversity and functional perspectives*. Elsevier, 2020.

[8] I. M. Bomze, "Lotka-volterra equation and replicator dynamics: new issues in classification," *Biological cybernetics*, vol. 72, no. 5, pp. 447–453, 1995.

[9] S. Dedrick, V. Warrier, K. P. Lemon, and B. Momeni, “When does a lotka-volterra model represent microbial interactions? insights from in vitro nasal bacterial communities,” *Msystems*, vol. 8, no. 3, pp. e00757–22, 2023.

[10] U.S. Environmental Protection Agency, “Method 410.1: Chemical oxygen demand (cod), titrimetric, mid-level for water and wastewater,” Environmental Monitoring and Support Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, Tech. Rep., 1978, accessed April 8, 2025. [Online]. Available: https://www.nemi.gov/methods/method_summary/5261/

[11] H. Liu, Y. Xu, L. Li, X. Dai, and L. Dai, “A review on application of single and composite conductive additives for anaerobic digestion: Advances, challenges and prospects,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 174, p. 105844, 2021.

[12] O. Schaetzle, F. Barrière, and K. Baronian, “Bacteria and yeasts as catalysts in microbial fuel cells: electron transfer from micro-organisms to electrodes for green electricity,” *Energy & Environmental Science*, vol. 1, no. 6, pp. 607–620, 2008.

[13] S. A. Patil, C. Hägerhäll, and L. Gorton, “Electron transfer mechanisms between microorganisms and electrodes in bioelectrochemical systems,” *Bioanalytical reviews*, vol. 4, pp. 159–192, 2012.

[14] D. R. Lovley, “The microbe electric: conversion of organic matter to electricity,” *Current opinion in Biotechnology*, vol. 19, no. 6, pp. 564–571, 2008.

[15] J. C. Biffinger, J. N. Byrd, B. L. Dudley, and B. R. Ringeisen, “Oxygen exposure promotes fuel diversity for shewanella oneidensis microbial fuel cells,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 23, no. 6, pp. 820–826, 2008.

[16] D. R. Bond and D. R. Lovley, “Electricity production by geobacter sulfurreducens attached to electrodes,” *Applied and environmental microbiology*, vol. 69, no. 3, pp. 1548–1555, 2003.

[17] R. K. Thauer, A.-K. Kaster, H. Seedorf, W. Buckel, and R. Hedderich, “Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation,” *Nature Reviews Microbiology*, vol. 6, no. 8, pp. 579–591, 2008.

[18] M. H. Gerardi, *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons, 2003.

[19] W. J. Jones, D. Nagle Jr, and W. B. Whitman, “Methanogens and the diversity of archaebacteria,” *Microbiological Reviews*, vol. 51, no. 1, pp. 135–177, 1987.

[20] G. Zhen, S. Zheng, X. Lu, X. Zhu, J. Mei, T. Kobayashi, K. Xu, Y.-Y. Li, and Y. Zhao, “A comprehensive comparison of five different carbon-based cathode materials in co2 electromethanogenesis: long-term performance, cell-electrode contact behaviors and extracellular electron transfer pathways,” *Bioresource technology*, vol. 266, pp. 382–388, 2018.

[21] N. I. Madondo, E. K. Tetteh, S. Rathilal, and B. F. Bakare, “Synergistic effect of magnetite and bioelectrochemical systems on anaerobic digestion,” *Bioengineering*, vol. 8, no. 12, p. 198, 2021.

[22] L. Luo, C. Cristofari, and S. Levrey, “Cogeneration: Another way to increase energy efficiency of hybrid renewable energy hydrogen chain–a review of systems operating in cogeneration and of the energy efficiency assessment through exergy analysis,” *Journal of Energy Storage*, vol. 66, p. 107433, 2023.

[23] R. F. de Souza, D. Z. Florio, E. Antolini, and A. O. Neto, “Partial methane oxidation in fuel cell-type reactors for co-generation of energy and chemicals: a short review,” *Catalysts*, vol. 12, no. 2, p. 217, 2022.

[24] B.-G. Zhang, S.-G. Zhou, H.-Z. Zhao, C.-H. Shi, L.-C. Kong, J.-J. Sun, Y. Yang, and J.-R. Ni, “Factors affecting the performance of microbial fuel cells for sulfide and vanadium (v) treatment,” *Bioprocess and biosystems engineering*, vol. 33, pp. 187–194, 2010.

[25] H. Instruments, “Guía para el análisis de la demanda química de oxígeno (dqo),” *Obtenido de HANNA Instruments: https://www. hannacolombia. com/blog/post/115/guia-parael-analisis-la-demanda-quimicaoxigeno-dqo*, 2019.

[26] R. Wang, H. You, B. Xie, G. Zhang, J. Zhu, W. Li, X. Dong, Q. Qin, M. Wang, Y. Ding *et al.*, "Performance analysis of microbial fuel cell-membrane bioreactor with reduced graphene oxide enhanced polypyrrole conductive ceramic membrane: Wastewater treatment, membrane fouling and microbial community under high salinity," *Science of The Total Environment*, vol. 907, p. 167827, 2024.

[27] J. C. Wooley, A. Godzik, and I. Friedberg, "A primer on metagenomics," *PLoS computational biology*, vol. 6, no. 2, p. e1000667, 2010.

[28] R. D. Sleator, C. Shortall, and C. Hill, "Metagenomics," *Letters in applied microbiology*, vol. 47, no. 5, pp. 361–366, 2008.

[29] M. K. A. Gavina, T. Tahara, K.-i. Tainaka, H. Ito, S. Morita, G. Ichinose, T. Okabe, T. Togashi, T. Nagatani, and J. Yoshimura, "Multi-species coexistence in lotka-volterra competitive systems with crowding effects," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, p. 1198, 2018.

[30] D. A. Jadhav, A. N. Ghadge, and M. M. Ghangrekar, "Enhancing the power generation in microbial fuel cells with effective utilization of goethite recovered from mining mud as anodic catalyst," *Bioresource technology*, vol. 191, pp. 110–116, 2015.

[31] O. Lefebvre, Z. Tan, Y. Shen, and H. Y. Ng, "Optimization of a microbial fuel cell for wastewater treatment using recycled scrap metals as a cost-effective cathode material," *Bioresource technology*, vol. 127, pp. 158–164, 2013.

[32] E. Estrada Arriaga *et al.*, "Generación de energía eléctrica a partir del tratamiento de aguas residuales por medio de bioceldas," 2013.

[33] D. M. Revelo, N. H. Hurtado, and J. O. Ruiz, "Microbial fuel cells (mfcs): a challenge for the removal of organic matter and electricity generation," *Información tecnológica*, vol. 24, pp. 17–28, 2013.

[34] A. E. Condori Pacheco and G. Torres Zamata, "Biodegradación de la materia orgánica y producción de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano (ccm) a partir del agua residual doméstica–lima," 2019.

[35] Y. R. GUZMÁN, "Implementación de una celda de combustible microbiano a partir de agua residual doméstica." *Trabajo de grado, Universidad de la Costa, Barranquilla*, 2016.

[36] A. J. Bard, L. R. Faulkner, and H. S. White, *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2022.

[37] J. Feng, X. Sun, Z. Li, X. Hao, M. Fan, P. Ning, and K. Li, "Plasma-assisted reforming of methane," *Advanced Science*, vol. 9, no. 34, p. 2203221, 2022.

[38] N. Darsaliya, R. Farukhshina, and Z. Saddik, "Transportation of hydrogen by main gas pipelines as a methane-hydrogen mixture," *Liquid and Gaseous Energy Resources*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, 2023.

[39] S. ISHII, Y. Hotta, and K. Watanabe, "Methanogenesis versus electrogenesis: morphological and phylogenetic comparisons of microbial communities," *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, vol. 72, no. 2, pp. 286–294, 2008.

[40] S. Jung and J. M. Regan, "Influence of external resistance on electrogenesis, methanogenesis, and anode prokaryotic communities in microbial fuel cells," *Applied and environmental microbiology*, vol. 77, no. 2, pp. 564–571, 2011.

[41] J. Beal, N. G. Farny, T. Haddock-Angelli, V. Selvarajah, G. S. Baldwin, R. Buckley-Taylor, M. Gershater, D. Kiga, J. Marken, V. Sanchania *et al.*, "Robust estimation of bacterial cell count from optical density," *Communications biology*, vol. 3, no. 1, p. 512, 2020.

[42] K. M. Tjørve and E. Tjørve, "The use of gompertz models in growth analyses, and new gompertz-model approach: An addition to the unified-richards family," *PloS one*, vol. 12, no. 6, p. e0178691, 2017.

[43] J. G. Volmer, H. McRae, and M. Morrison, "The evolving role of methanogenic archaea in mammalian microbiomes," *Frontiers in microbiology*, vol. 14, p. 1268451, 2023.