



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**COMPARATIVA EXPERIMENTAL DE CELDAS DE
COMBUSTIBLE MICROBIANAS DE BAJO COSTE EN
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Autor: Diego Bermúdez Ortiz

Director: María del Mar Cledera Castro

Co-Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Viabilidad de implantación de una celda de combustible microbiano en una planta de
tratamiento de aguas residuales
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Diego Bermudez Ortiz Fecha: 16/ 07/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: María del Mar Cledera Castro Fecha://



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**COMPARATIVA EXPERIMENTAL DE CELDAS DE
COMBUSTIBLE MICROBIANAS DE BAJO COSTE EN
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Autor: Diego Bermudez Ortiz

Director: María del Mar Cledera Castro

Co-Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad, especialmente al Departamento de Ingeniería Medioambiental, Mar e Iñigo, por darme acceso a todo el material necesario para la compleción de este trabajo. También la ayuda de Fernando del laboratorio de medioambiental y Antonio del taller de electrotecnia por ayudarme en todo momento.

COMPARATIVA EXPERIMENTAL DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS DE BAJO COSTE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Autor: Bermúdez Ortiz, Diego.

Director: Cledera Castro, María del Mar.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Se construyeron y ensayaron una MFC de doble cámara con puente salino y dos WMFC de bajo coste, evaluando su capacidad para generar electricidad y depurar aguas residuales. La MFC de doble cámara alcanzó la mayor tensión y eficiencia de depuración en períodos cortos, mientras que la WMFC de pino se aproximó a estos valores tras 48 horas, demostrando su potencial en tratamientos prolongados. Los resultados confirman la viabilidad de alternativas sostenibles y evidencian la influencia del diseño y los materiales en el rendimiento global, señalando oportunidades de mejora en el control de humedad y la optimización de la estructura de las WMFC.

Palabras clave: MFC, aguas residuales, CCM, microbiano.

1. Introducción

La gestión sostenible del agua y el tratamiento de residuos constituyen desafíos clave ante el crecimiento demográfico y la intensificación de la actividad industrial. Frente a esta problemática, la visión contemporánea sobre las aguas residuales ha evolucionado desde considerarlas un desecho hacia verlas como un recurso potencial, promoviendo la recuperación de valor y la generación de energía a partir de ellas (European Investment Bank. & Environment and Natural Resources Department., 2022) . Las celdas de combustible microbianas (MFC) destacan por su capacidad para transformar la materia orgánica de las aguas residuales en electricidad y depurarlas de manera sostenible, gracias a la acción de bacterias electrogénicas que transfieren electrones al electrodo generando corriente eléctrica. Su desarrollo responde a la necesidad de soluciones que combinen la reducción de contaminantes con la obtención de energía renovable, alineadas con los principios de sostenibilidad y economía circular.

2. Definición del proyecto

Este trabajo analiza el potencial de las MFC como solución emergente para la generación de energía renovable y el tratamiento eficiente de aguas residuales, en un contexto en el que la investigación ha avanzado, pero persisten limitaciones en eficiencia, costes y escalabilidad. Se han comparado experimentalmente prototipos de MFC de doble cámara y de madera, WMFC (Tahir et al., 2024), evaluando su viabilidad y desempeño tanto en depuración (reducción de DQO) como en generación eléctrica (tensión en circuito abierto, densidad de corriente y densidad de potencia bajo distintas resistencias externas), considerando dos tiempos de retención hidráulica (24 y 48 horas). Además, se explora la capacidad de las WMFC como alternativa de bajo coste y se plantean mejoras y líneas de investigación futura orientadas a la optimización y escalabilidad de la tecnología.

3. Descripción de las Celdas de combustible microbiano

Se han construido y ensayado dos tipos principales de celdas: una MFC de doble cámara conectada mediante un puente salino y dos WMFC fabricadas con madera de pino y OSB-3.

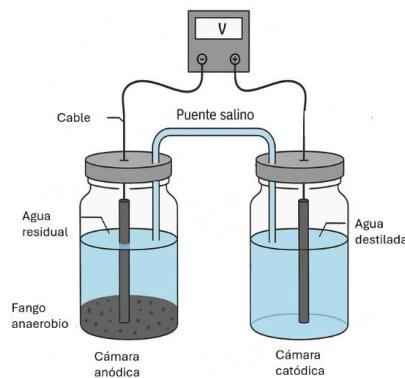


Figura 1 Esquema de MFC de doble cámara
realizada en el ensayo

Fuente Khan et al, 2012

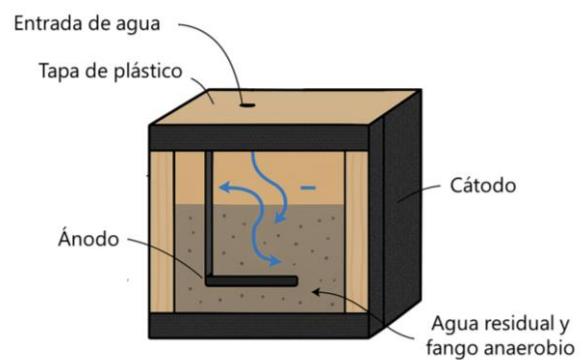


Figura 2 Esquema de las WMFC de los ensayos

Fuente Elaboración propia 2025

La elección de estos diseños responde a la necesidad de eliminar las costosas membranas de intercambio protónico comerciales. Así, se ha optado por una MFC de doble cámara en la que la separación entre compartimentos se realiza mediante un puente salino a base de agar-agar y sales, y por WMFCs en las que la madera actúa simultáneamente como estructura, separador y medio de difusión protónica. En todos los casos, el ánodo estuvo en contacto con fango anaerobio y agua residual urbana enriquecida. Las celdas se dejaron reposar durante una semana para permitir la formación de biopelícula, controlando el pH (6,5–7,5) y la temperatura (22–28 °C). Durante los ensayos se registraron la tensión generada bajo diferentes resistencias externas y la reducción de DQO para cada configuración y HRT, lo que permitió comparar la eficiencia depuradora y el rendimiento eléctrico bajo condiciones homogéneas de laboratorio.

4. Resultados

Durante los ensayos experimentales se registraron los valores de tensión eléctrica generada por las distintas configuraciones de MFC utilizando un voltímetro digital, lo que permitió analizar el comportamiento electroquímico y estimar la resistencia interna de cada celda.

Se empleó la curva tensión-resistencia (V-R) para cada prototipo, variando la resistencia externa conectada al circuito, lo que facilitó la identificación de la tensión en circuito abierto (OCV) y la determinación de las condiciones de máxima transferencia de potencia.

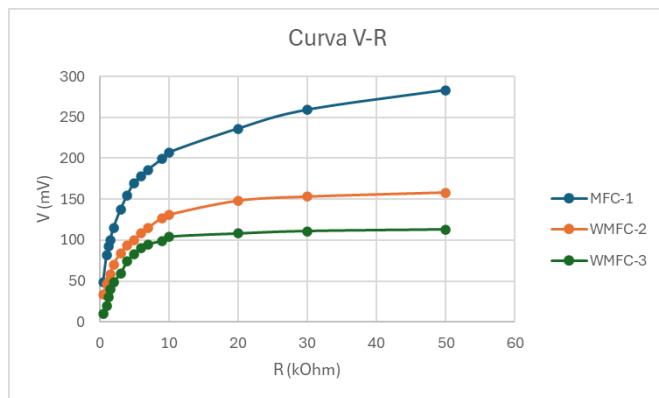


Figura 3 Curva V-R de las tres MFC

Las mediciones mostraron que la MFC de doble cámara con puente salino alcanzó la mayor tensión en circuito abierto (OCV, 446 mV), resultado de una separación eficiente entre cámaras y una menor competencia por aceptores de electrones. Las WMFC de pino y OSB-3 presentaron valores menores (168 mV y 114 mV), limitados por la difusión protónica y la porosidad de los materiales empleados.

En cuanto a la densidad de potencia, la MFC de doble cámara obtuvo el mayor valor (5,11 mW/m² para una resistencia óptima de 1,25 kΩ), seguida por la WMFC de pino (0,61 mW/m², 2 kΩ) y la WMFC de OSB-3 (0,46 mW/m², 4 kΩ), lo que refleja el impacto de la resistencia interna y de la estructura material en el rendimiento global.

Respecto a la eficiencia de depuración, tras 24 horas la reducción de DQO fue máxima en la MFC de doble cámara (35,29 %), seguida de la WMFC de pino (20,78 %) y la de OSB-3 (16,27 %). Con un HRT de 48 horas, la WMFC de pino mejoró notablemente su eficiencia (42,16 %), acercándose a la doble cámara (44,71 %), mientras que la WMFC de OSB-3 se mantuvo en valores bajos (19,02 %).

5. Conclusiones

La WMFC de pino mostró mejores resultados eléctricos que la de OSB 3, atribuibles a su mayor porosidad y menor espesor, aunque esta última destacó por su durabilidad y menor coste, resultando interesante desde una perspectiva económica. Se observó que la resistencia interna total de las WMFC es superior a la de la MFC de doble cámara, debido a limitaciones estructurales y de difusión iónica.

En cuanto a la reducción de DQO, la configuración de doble cámara fue más eficaz en tratamientos cortos, mientras que la WMFC de pino logró resultados competitivos en periodos más prolongados. El estudio detectó limitaciones relacionadas con la evaporación, la degradación de materiales y la variabilidad del biofilm.

Para futuras investigaciones se recomienda optimizar el diseño de las WMFC, mejorar el control de humedad, estudiar configuraciones de escalado, extender la duración de los ensayos y profundizar en el análisis microbiológico para incrementar la eficiencia global del sistema.

6. Referencias

European Investment Bank. & Environment and Natural Resources Department. (2022). *Wastewater as a resource: May 2022*.

Tahir, C. A., Agarwal, C., Pásztory, Z., & Csóka, L. (2024). A novel membrane-less microbial fuel cell reactor using wood as container and separator to prevent air–cathode deterioration and biofouling.

EXPERIMENTAL COMPARISON OF LOW-COST MICROBIAL FUEL CELLS IN WASTEWATER TREATMENT

Author: Bermúdez Ortiz, Diego.

Supervisor: Cledera Castro, María del Mar.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

A Two-chamber MFC with a salt bridge and two low-cost WMFCs were built and tested, evaluating their capacity to generate electricity and treat wastewater. The two-chamber MFC achieved the highest voltage and purification efficiency in short periods, while the pine WMFC approached these values after 48 hours, demonstrating its potential in prolonged treatments. The results confirm the viability of sustainable alternatives and highlight the influence of design and materials on overall performance, pointing out opportunities for improvement in moisture control and optimization of the WMFC structure.

Keywords: MFC, wastewater, WMFC, microbial

1. Introduction

Sustainable water management and waste treatment are key challenges in the face of population growth and intensified industrial activity. In response to this issue, the contemporary view of wastewater has evolved from considering it as waste to seeing it as a potential resource, promoting value recovery and energy generation from it (European Investment Bank & Environment and Natural Resources Department, 2022). Microbial fuel cells (MFCs) stand out for their capacity to transform the organic matter in wastewater into electricity and purify it sustainably, thanks to the action of electrogenic bacteria that transfer electrons to the electrode, generating an electric current. Their development responds to the need for solutions that combine pollutant reduction with renewable energy generation, aligned with the principles of sustainability and the circular economy.

2. Project definition

This work analyzes the potential of MFCs as an emerging solution for renewable energy generation and efficient wastewater treatment, in a context in which research has advanced but limitations in efficiency, cost, and scalability persist. Prototypes of two-chamber MFCs and wood-based WMFCs (Tahir et al., 2024) have been experimentally compared, evaluating their viability and performance both in treatment (COD reduction) and in electrical generation (open circuit voltage, current density, and power density under different external resistances), considering two hydraulic retention times (24 and 48 hours). In addition, the capacity of WMFCs as a low-cost alternative is explored, and improvements and lines of future research are proposed, aimed at optimizing and scaling the technology.

3. Description of the Microbial Fuel Cell

Two main types of cells were built and tested: a two-chamber MFC connected via a salt bridge, and two WMFCs made with pine wood and OSB-3.

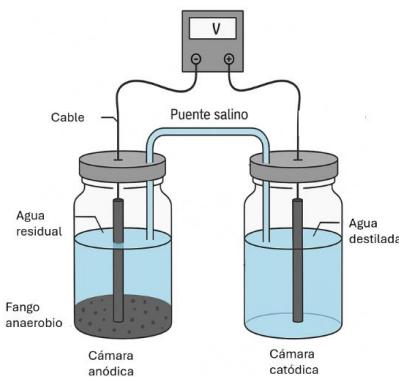


Figure 4 Schematic of the double chamber MFC

Fuente Khan et al, 2012

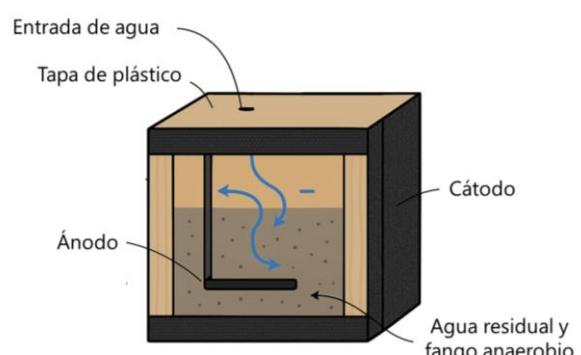


Figure 2 Schematic of the double chamber MFC

Fuente Elaboración propia 2025

The choice of these designs responds to the need to eliminate expensive commercial proton exchange membranes. Thus, a two-chamber MFC was chosen, in which the separation between compartments is achieved through a salt bridge made of agar-agar and salts, and WMFCs in which the wood acts simultaneously as the structure, separator, and proton diffusion medium. In all cases, the anode was in contact with anaerobic sludge and enriched urban wastewater. The cells were left to rest for a week to allow the formation of a biofilm, with controlled pH (6.5–7.5) and temperature (22–28 °C). During the tests, the voltage generated under different external resistances and the COD reduction for each configuration and HRT were recorded, which allowed comparison of purification efficiency and electrical performance under homogeneous laboratory conditions.

4. Results

During the experimental tests, the voltage values generated by the different MFC configurations were recorded using a digital voltmeter, which allowed the electrochemical behavior to be analyzed and the internal resistance of each cell to be estimated. The voltage-resistance (V-R) curve was used for each prototype, varying the external resistance connected to the circuit, which facilitated the identification of the open circuit voltage (OCV) and the determination of the conditions of maximum power transfer. Measurements showed that the two-chamber MFC with a salt bridge reached the highest open circuit voltage (OCV, 446 mV), the result of efficient separation between chambers and less competition for electron acceptors. The pine and OSB-3 WMFCs showed lower values (168 mV and 114 mV), limited by proton diffusion and the porosity of the materials used.

Regarding power density, the two-chamber MFC obtained the highest value (5.11 mW/m^2

for an optimal resistance of $1.25 \text{ k}\Omega$), followed by the pine WMFC (0.61 mW/m^2 , $2 \text{ k}\Omega$) and the OSB-3 WMFC (0.46 mW/m^2 , $4 \text{ k}\Omega$), reflecting the impact of internal resistance and

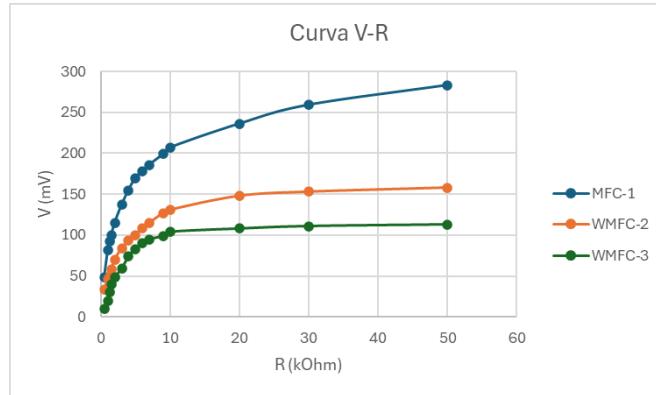


Figura 5 V-R curve of the three MFC material structure on overall performance.

Regarding purification efficiency, after 24 hours the maximum COD reduction was in the two-chamber MFC (35.29 %), followed by the pine WMFC (20.78 %) and the OSB-3 (16.27 %). With an HRT of 48 hours, the pine WMFC notably improved its efficiency (42.16 %), approaching the two-chamber (44.71 %), while the OSB-3 WMFC remained at low values (19.02 %).

5. Conclusiones

The pine WMFC showed better electrical results than the OSB-3, attributable to its greater porosity and lower thickness, although the latter stood out for its durability and lower cost, making it interesting from an economic perspective. It was observed that the total internal resistance of WMFCs is higher than that of the two-chamber MFC, due to structural and ionic diffusion limitations. In terms of COD reduction, the two-chamber configuration was more effective in short treatments, while the pine WMFC achieved competitive results over longer periods. The study detected limitations related to evaporation, material degradation, and biofilm variability.

For future research, it is recommended to optimize the WMFC design, improve moisture control, study scaling configurations, extend the duration of tests, and deepen microbiological analysis to increase the overall efficiency of the system.

6. References

- European Investment Bank. & Environment and Natural Resources Department. (2022). *Wastewater as a resource: May 2022*.
- Tahir, C. A., Agarwal, C., Pásztor, Z., & Csóka, L. (2024). A novel membrane-less microbial fuel cell reactor using wood as container and separator to prevent air–cathode deterioration and biofouling.

Índice de la memoria

1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto.....	6
2. Estado de la Cuestión	11
2.1 Principio de funcionamiento de las celdas de combustible microbianas (MFC).....	15
2.1.1 Reacciones anódicas	15
2.1.2 Reacciones catódicas.....	17
2.2 Aplicaciones de las MFC actualmente	19
3. Definición del Trabajo	24
3.1 Justificación.....	24
3.2 Objetivos	26
3.3 Alineamiento con los ODS.....	26
4. Diseño	29
4.1 Componentes	29
4.1.1 Ánodo.....	29
4.1.2 Cátodo	31
4.1.3 Membrana de intercambio iónico / Puente Salino	32
4.1.4 Reactores.....	33
4.1.5 Circuito externo.....	34
4.2 Disposición.....	34
4.3 MFC de una cámara	35
4.4 MFC de doble cámara por puente salino.....	37
5. Montaje y operación de las MFC.....	40
5.1 MFC de doble cámara con puente salino	40
5.2 Wood Microbial Fuel Cell (WMFC).....	42
6. Metodología ensayo.....	47
6.1 Variables de control.....	47
6.2 Objetivos del Ensayo.....	48
6.3 Materiales utilizados.....	48

6.4 Procedimiento Experimental	48
7. Resultados.....	51
7.1 Mediciones eléctricas	51
7.2 Determinación de la DQO.....	59
8. Conclusiones y Trabajos futuros	61
9. Bibliografía.....	64

ANEXO I 70

Índice de figuras

Figura 1 Esquema de MFC de doble cámara realizada en el ensayo	9
Figura 2 Esquema de las WMFC de los ensayos.....	9
Figura 3 Curva V-R de las tres MFC.....	10
Figura 4 Tratamiento de aguas residuales mundial (%)	7
Figura 5 Esquema de una CCM.....	9
Figura 6 Configuración básica de una MFC.....	11
Figura 7 MFC-alga	13
Figura 8 Ecobot III	22
Figura 9 Diseño típico de una MFC de cámara única	35
Figura 10- WMFC	36
Figura 11 Esquema de MFC de puente salino	38
Figura 12 Esquema doble cámara puente salino	40
Figura 13 MFC de doble cámara de los ensayos	42
Figura 14 Esquema WMFC	43
Figura 15 Cámara de las WMFCs de los ensayos	45
Figura 16 Conexión cátodo exterior	46
Figura 17 Comprobación conductividad WMFC 1	46
Figura 18 Prueba Piloto	50
Figura 19 Curva V-R MFC.....	53
Figura 20 Curva Potencia MFC-1	55
Figura 21 Curva Potencia WMFC-2 y WMFC-3	56
Figura 22 Detalle Curva Potencia MFC-1C-3	58
Figura 23 Puente salino utilizado en el ensayo.....	71
Figura 24 Espectrofotómetro utilizado	71
Figura 25 Cubetas usadas en los ensayos	72
Figura 26 Digestor utilizado en los ensayos.....	73

Figura 27 Ejemplo de ensayo de MFC de doble cámara.....	74
Figura 28 Caja de décadas	74
Figura 29 MWFC de OSB-3.....	75

Índice de tablas

Tabla 1 Materiales comunes usados como ánodo en MFCs.....	30
Tabla 2 Tensión pico tras 24 H.....	52
Tabla 3 Reducción de DQO (%).....	59
Tabla 4 Detalle eléctrico MFC-1	75
Tabla 5 Detalle eléctrico WMFC-2	76
Tabla 6 Detalle disminución de DQO (mg/L)	77
Tabla 7 Detalle eléctrico WMFC-3	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La gestión sostenible de los recursos hídricos y la mitigación de impactos ambientales son retos que deben estarse enfrentando actualmente y en las próximas décadas. A medida que la población crece y la industrialización avanza, la producción de desechos sólidos y líquidos aumenta exponencialmente, generando un alto potencial contaminante que puede afectar tanto a los ecosistemas como a la salud humana si no se manejan de manera adecuada.

La contaminación de los recursos hídricos representa una amenaza crítica para el suministro de agua potable y la salud ambiental a nivel global. Según informes recientes, c. La insuficiencia en la infraestructura de tratamiento hace que gran parte de estas aguas residuales se liberen al medio ambiente sin tratamiento adecuado, resultando en altos niveles de contaminantes químicos y microbiológicos en ríos, lagos y acuíferos.

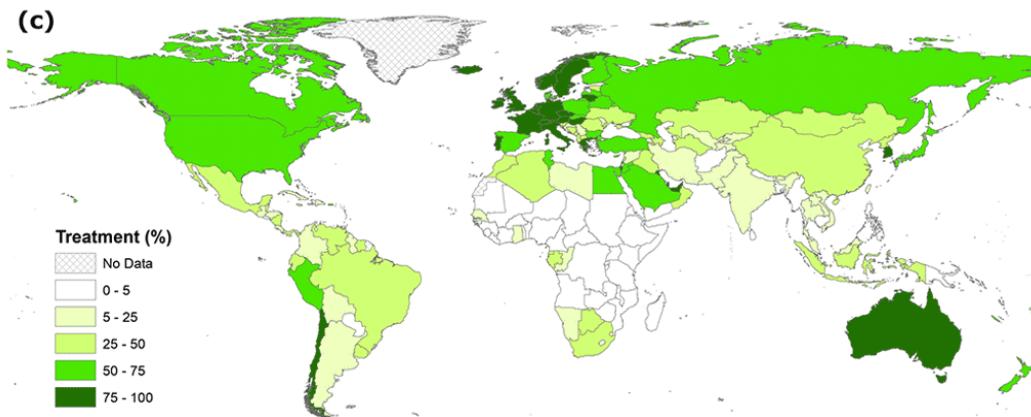


Figura 6 Tratamiento de aguas residuales mundial (%)

Fuente (Jones et al., 2021)

Esto no solo afecta directamente la salud humana al aumentar los riesgos de enfermedades transmitidas por el agua, sino que también genera impactos ambientales significativos como la degradación de hábitats acuáticos o la eutrofización, que reduce la calidad del agua y limita su uso para consumo humano, agrícola e industrial.

Ejemplos de los efectos devastadores de la contaminación por aguas residuales son la hipereutrofización de la laguna de la Albufera en Valencia, que durante más de 40 años fue utilizada como un tratamiento de aguas residuales, con poblaciones muy altas de fitoplancton, turbidez muy alta y concentraciones de oxígeno disuelto muy bajas que han tenido un impacto dramático en la biodiversidad de la laguna.(Martín et al., 2020). Un ejemplo fuera de Europa es el río Tietê en São Paulo, Brasil. Históricamente, fue un ecosistema vibrante que sustentaba una gran diversidad biológica. Sin embargo, décadas de vertidos industriales y domésticos sin tratamiento adecuado han convertido gran parte del río en un ecosistema prácticamente muerto, con niveles extremadamente bajos de oxígeno disuelto y una alta concentración de sustancias tóxicas. Este deterioro no solo ha extinguido la vida acuática en varias secciones del río, sino que también afecta negativamente la salud pública y limita drásticamente las posibilidades de

utilizar el agua para actividades recreativas, agrícolas e industriales. (Urbanski & Nogueira, 2024)

En la actualidad se empiezan a ver las aguas residuales como un posible recurso por parte de los países desarrollados y se están interesando activamente por mejorar la gestión de las aguas residuales. (European Investment Bank. & Environment and Natural Resources Department., 2022) El objetivo es ir más allá de la reducción de la contaminación y tratar de obtener valor de ellas. Como consecuencia, el sector de las aguas residuales de los países desarrollados ha dejado de limitarse a la reducción de la contaminación.(Jones et al., 2021)

La confección de posibles soluciones para satisfacer las necesidades energéticas globales y el tratamiento de residuos sin comprometer el medio ambiente son esenciales; lo que nos aterraza en el estudio de las celdas de combustible microbiana para tratar estos problemas.

En este contexto, surge la motivación por explorar tecnologías innovadoras como las celdas de combustible microbianas (CCM), conocidas en inglés como *Microbial Fuel Cells* (MFC). Las MFC representan una alternativa prometedora que permite abordar simultáneamente varios de estos desafíos. A través del aprovechamiento de procesos bioelectroquímicos, estas celdas pueden convertir la materia orgánica presente en las aguas residuales en energía eléctrica entre otras aplicaciones. Este enfoque no solo contribuye a reducir la carga contaminante de las aguas residuales, sino que también ofrece una solución viable y efectiva para generar energía limpia o reducir la energía consumida en estos procesos.

Estas celdas utilizan biocatalizadores, principalmente bacterias electrogénicas, capaces de transformar la energía química de compuestos orgánicos en energía eléctrica a través de procesos metabólicos. Las MFC se componen esencialmente de una cuba electrolítica que contiene un ánodo y un cátodo conectados a un circuito externo. En el ánodo, las

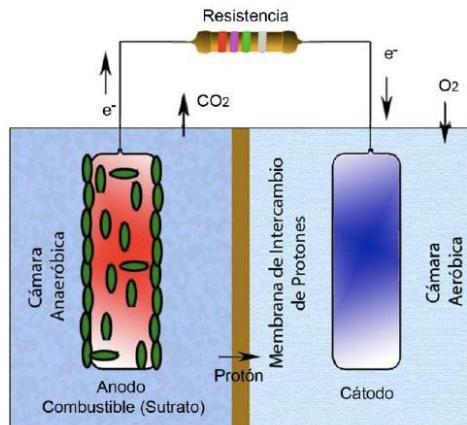


Figura 7 Esquema de una MFC

Fuente (Revelo et al., 2013)

bacterias metabolizan los compuestos orgánicos, liberando electrones y protones. Los electrones son transferidos a través de un circuito externo hacia el cátodo, generando así una corriente eléctrica.

Esta idea de generar energía a partir del tratamiento de desechos orgánicos es muy atractiva hoy en día debido a la creciente importancia de la sostenibilidad en la sociedad y la previsión del gran aumento de población mundial con el consiguiente aumento de desechos y necesidades energéticas por parte de este crecimiento.

En definitiva, la motivación para desarrollar y optimizar las celdas de combustible microbianas radica no solo en la necesidad de gestionar eficientemente las aguas residuales y reducir la contaminación, sino también en la urgente búsqueda de soluciones integrales y sostenibles que permitan enfrentar eficazmente los grandes desafíos ambientales del siglo XXI, como la acidificación de los océanos y la degradación de los recursos hídricos.

En este proyecto se diseñan unos prototipos de MFC de doble cámara y WMFC para comparar su rendimiento, cuyos detalles y resultados se presentan en capítulos posteriores para enfrentarse a estos retos mediante soluciones innovadoras y responsables.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Los electrodos deben tener propiedades como alta conductividad eléctrica, estabilidad mecánica, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad para permitir el crecimiento adecuado de los microorganismos electrogénicos y una transferencia eficiente de electrones.(Saravanan et al., 2022) El catalizador, que son los propios microorganismos, cumple una doble función: degradar la materia orgánica presente en el sustrato y transferir los electrones generados al ánodo. La membrana, por su parte, permite el paso de protones desde la cámara anódica hacia la catódica, cerrando el circuito electroquímico y completando la generación de corriente.

La primera decisión que se debe tener en el diseño en base a restricciones como espacio,

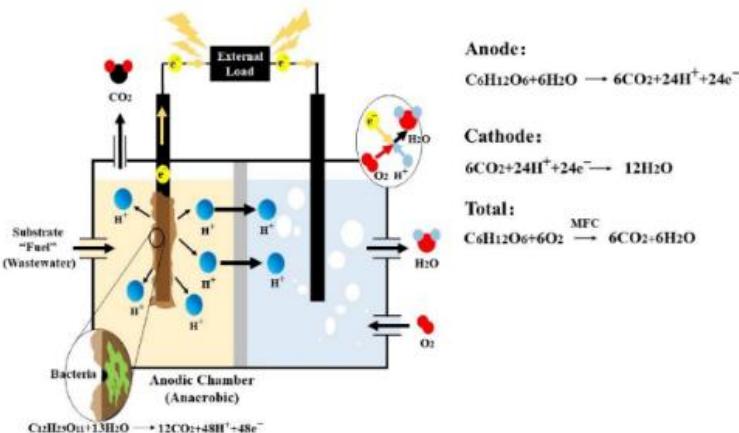


Figura 8 Configuración básica de una MFC

Fuente (Kurniawan et al., 2022)

coste, nivel de oxidación de materia orgánica requerido, tipo de residuo a tratar o la densidad energética es la configuración de la celda. Los principales diseños de las distintas MFCs son:

1. **MFC de una cámara:** Este diseño consiste en una única cámara en la que se encuentra tanto el ánodo como el cátodo, separados por una membrana o incluso sin ella. El ánodo está sumergido en un ambiente anaerobio, mientras que el cátodo está en contacto con el oxígeno atmosférico. Se utilizan principalmente por su simplicidad de construcción, bajo coste y facilidad de operación.
2. **MFC de doble cámara:** En esta configuración, el ánodo y el cátodo se encuentran en compartimentos separados, conectados mediante una membrana de intercambio protónico o un puente salino. Esta separación permite controlar mejor las condiciones anaerobias en el ánodo y las aeróbicas en el cátodo. Si bien ofrece mejor eficiencia energética y mayor selectividad, su construcción es más compleja y requiere mayor mantenimiento.
3. **MFC-Vegetal:** Este tipo de celda utiliza las raíces de plantas vivas como fuente de materia orgánica. Las exudaciones radiculares sirven de sustrato para los microorganismos electrogénicos en el ánodo. Es ideal para instalar en humedales construidos, suelos agrícolas o zonas pantanosas, generando energía mientras se conserva o remedia el entorno. Su principal ventaja es que funciona de manera continua sin necesidad de alimentación externa de sustrato, aunque su eficiencia energética es baja y depende del metabolismo vegetal y de las estaciones.(Nitisoravut & Regmi, 2017).
4. **MFC de fase sólida:** Estas MFC utilizan residuos sólidos orgánicos como sustrato, como restos de comida, compost o residuos agrícolas. El ánodo se sitúa en contacto directo con los sólidos, sin necesidad de medios líquidos. Esta configuración permite una valoración energética de residuos sólidos, produciendo tanto electricidad como subproductos útiles como compost. Son sistemas robustos, de bajo coste, y adecuados para zonas rurales o instalaciones descentralizadas, aunque la difusión de protones puede ser limitada en ausencia de líquido conductor.

5. **MFC-alga:** En este diseño, se incorporan algas fotosintéticas en el compartimento catódico. A través de la fotosíntesis, las algas generan oxígeno in situ, lo que permite la reducción de electrones sin necesidad de burbujeo de aire ni aireación externa. Además, algunas algas pueden actuar como donadores de electrones en el ánodo. Esta celda contribuye a la captura

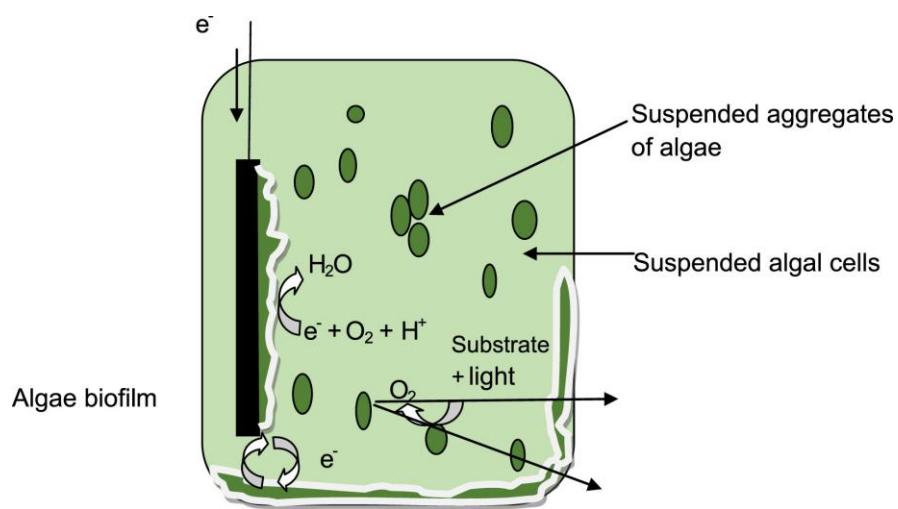


Figura 9 MFC-alga

Fuente (Saba et al., 2017)

de CO₂, es ecológica y tiene aplicaciones prometedoras en acuicultura o tratamiento de aguas residuales con nutrientes, aunque su diseño es más complejo y requiere condiciones controladas de luz.(Saba et al., 2017).

6. **MFC de sedimentación:** También conocidas como MFC bentónicas, aprovechan los sedimentos ricos en materia orgánica (como los de lagos, ríos o mares) como fuente de electrones. El ánodo se entierra en el sedimento anóxico y el cátodo se sitúa en el agua, en contacto con el oxígeno disuelto. Se utilizan con frecuencia para alimentar sensores ambientales en ubicaciones remotas como fondos marinos o embalses, ya que no requieren

mantenimiento y operan de forma continua. Su densidad de potencia es baja, pero resultan ideales para aplicaciones de bajo consumo energético.

Otra de las claves del desarrollo de esta tecnología está en uno de los componentes estructurales de las MFC: las bacterias electrogénicas. Bacterias como *Geobacter sulfurreducens* o *Shewanella oneidensis* han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para transferir electrones directamente al electrodo. El rendimiento de una MFC está estrechamente ligado a la eficiencia de estas bacterias: cuanto mayor es su capacidad de oxidar materia orgánica y transferir electrones, mayor será la densidad de corriente generada y más eficaz el tratamiento de residuos.(Redondo Iriarte, 2018)(Revelo et al., 2013) A este aspecto se suma la investigación sobre la mejora genética de microorganismos que puedan adaptarse a distintos tipos de sustratos o condiciones ambientales. Asimismo, se exploran constantemente nuevas fuentes microbianas provenientes de ambientes extremos o sedimentos naturales que podrían aportar cepas más eficientes. Unas bacterias con mayor capacidad de reducción química de materia orgánica resultan en una mayor velocidad de tratamiento de residuos y mayor densidad de potencia generada, lo que desemboca en un tratamiento de residuos más veloz y de menor coste.

Por último, otros aspectos estudiados en la investigación de las celdas de combustible microbianas es la optimización de las condiciones operativas que permiten maximizar su eficiencia y sostenibilidad. Variables como el pH, la temperatura, la concentración de nutrientes y la disponibilidad de sustratos orgánicos inciden directamente en la actividad metabólica de los microorganismos. Se ha demostrado que un ajuste fino de estos parámetros permite incrementar significativamente la tasa de degradación de residuos y la producción de electricidad.(Singh & Dharmendra, 2020)

Ajustar estos parámetros permite no solo mejorar la actividad metabólica de las bacterias, sino también minimizar los tiempos de degradación de los residuos y maximizar la producción de corriente.

En resumen, el estudio de las MFC hasta ahora se enfrenta al reto de equilibrar eficiencia energética, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. La investigación continúa en la búsqueda de configuraciones más efectivas, materiales accesibles y microorganismos más versátiles, con el objetivo de consolidar a las MFC como una tecnología clave en la gestión de residuos y la producción de energía renovable.

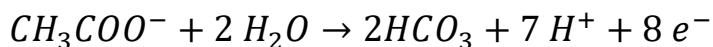
Entre todas estas aplicaciones, en este proyecto nos centraremos en la generación de energía y la depuración de agua residual en pequeña escala

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (MFC)

2.1.1 REACCIONES ANÓDICAS

En la cámara anódica, mantenida en condiciones anaerobias, los microorganismos electrogénicos, también conocidos como exoelectrógenos, oxidan los compuestos orgánicos presentes en el sustrato y transfieren los electrones liberados al electrodo (ánodo), en lugar de a un acceptor final convencional como el oxígeno (Pant et al., 2010). Esta oxidación biológica da lugar a la producción de dióxido de carbono (CO_2), protones (H^+) y electrones (Borjas, 2016). Los electrones son recogidos por el ánodo y circulan a través de un circuito externo hacia el cátodo, mientras que los protones migran a través del electrolito hacia el compartimento catódico, cerrando así el ciclo electroquímico.

Un ejemplo representativo de reacción anódica, cuando el sustrato es acetato, es el siguiente:



Para que estas reacciones anódicas tengan lugar de forma eficiente, es esencial la formación y estabilización de una biopelícula microbiana sobre la superficie del ánodo. Esta estructura permite que las bacterias electrogénicas se asienten sobre la superficie conductora del electrodo, facilitando así la transferencia efectiva de electrones (Santoro et al., 2017). Se ha demostrado que mayores densidades de corriente se obtienen cuando la biopelícula

formada presenta propiedades eléctricas conductoras, ya que esto posibilita que múltiples capas celulares contribuyan simultáneamente a la generación de corriente.

Diversos estudios han identificado microorganismos específicos capaces de realizar una transferencia electrónica directa hacia el ánodo. Por ejemplo, en el caso de *Geobacter sulfurreducens*, se ha demostrado que una red densa de pili conductores (nanocables) atraviesa la biopelícula, permitiendo que los electrones se transporten eficientemente a través de múltiples capas celulares (Franks et al., 2010). Estos nanocables, compuestos principalmente por proteínas tipo pilina con estructuras aromáticas, actúan conjuntamente con citocromos tipo c, que desempeñan un papel fundamental en la transferencia electrónica directa.

Sin embargo, no todas las bacterias electrogénicas tienen la capacidad de transferir electrones directamente. Aquellas que presentan membranas menos conductoras utilizan mecanismos alternativos de transferencia electrónica indirecta, mediada por moléculas pequeñas redox solubles conocidas como mediadores. Estos mediadores pueden ser añadidos de forma externa (mediadores exógenos) o producidos naturalmente por los propios microorganismos (mediadores endógenos). Entre los mediadores artificiales se encuentran colorantes y compuestos redox como el rojo neutro o el azul de metileno (Du et al., 2007). No obstante, su empleo a escala práctica se limita debido a problemas de toxicidad, inestabilidad y costes. Por ello, las MFC modernas suelen evitar su uso, prefiriendo aquellos microorganismos que producen mediadores endógenos como flavinas en el caso de *Shewanella oneidensis*.

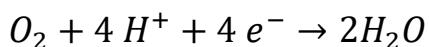
El mantenimiento de condiciones estrictamente anaerobias en el ánodo es fundamental para evitar que microorganismos aerobios o aceptores alternativos (sulfato, nitrato, etc.) compitan por los electrones, lo que disminuiría la eficiencia eléctrica del sistema. (Huang et al., 2021)

En resumen, la eficiencia del ánodo depende críticamente del mecanismo predominante de transferencia electrónica, de la composición y estructura de la biopelícula microbiana, y de las condiciones ambientales, tales como pH, temperatura y concentración del sustrato.

2.1.2 REACCIONES CATÓDICAS

En el electrodo catódico tiene lugar la reducción del aceptor final de electrones, utilizando los electrones que llegan desde el ánodo a través del circuito externo y los protones que migran desde la cámara anódica. El oxígeno molecular (O_2) es el aceptor más empleado, principalmente por su alto potencial redox y su disponibilidad (Yuan & He, 2015).

La reacción principal que ocurre en el cátodo es la reducción del oxígeno a agua:



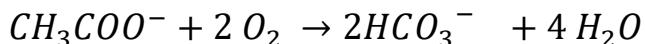
Se han investigado aceptores alternativos al oxígeno, tales como nitrato, perclorato, persulfato o metales de transición. Por ejemplo, el uso de nitrato permite acoplar la desnitrificación al proceso de generación eléctrica. Sin embargo, muchos aceptores alternativos requieren regeneración química continua, lo que limita su aplicabilidad práctica (Logan et al., 2006).

Aunque el oxígeno es energéticamente favorable y ampliamente disponible, presenta limitaciones cinéticas significativas a pH neutro, ralentizando considerablemente la velocidad de reacción en el cátodo (Yuan & He, 2015). Por esta razón, se recurre al empleo de catalizadores específicos que aceleren la cinética de la reducción. El platino (Pt) es un gran catalizador debido a su alta eficiencia, aunque se investiga continuamente alternativas más económicas como óxidos metálicos (MnO_2 , Co_3O_4), nanomateriales de carbono dopados, y polímeros conductores (He et al., 2017).

El material del cátodo también desempeña un papel importante en la eficiencia del proceso. Normalmente, se usan materiales carbonosos debido a su buena conductividad eléctrica y estabilidad química. Además, deben permitir la difusión efectiva del oxígeno y mantener una adecuada interfaz triple fase (gas-líquido-sólido) esencial para la reacción de reducción de oxígeno. Actualmente, se exploran biocátodos, formados por microorganismos específicos, capaces de catalizar reacciones catódicas de forma económica y sostenible.

Balance global y eficiencia energética

La reacción global en una MFC implica la conversión de un sustrato orgánico y oxígeno molecular en dióxido de carbono y agua, liberando energía que es parcialmente recuperada en forma de electricidad. Tomando el acetato como ejemplo, la reacción global puede resumirse como:



Este proceso es equiparable a la respiración aerobia controlada electroquímicamente, en la que una fracción de la energía liberada en la oxidación de la materia orgánica se recupera en forma de electricidad en vez de disiparse por completo como calor.

La eficiencia energética global de una MFC depende principalmente de tres aspectos fundamentales: la eficiencia coulombica (fracción de electrones efectivamente convertidos en electricidad), la resistencia interna total del sistema, y las pérdidas por sobrepotenciales en ánodo y cátodo (Logan et al., 2006)

En la práctica, no toda la energía contenida en el sustrato se convierte en electricidad útil debido a pérdidas por rutas metabólicas secundarias (fermentación, metanogénesis), fugas de oxígeno, sobrepotenciales en los electrodos y resistencias internas.

Factores como la composición del electrolito, distancia entre electrodos, propiedades de los materiales empleados (conductividad y superficie efectiva) y condiciones operativas como temperatura y pH afectan considerablemente la eficiencia global del sistema (Kurniawan et al., 2022)). En términos generales, la eficiencia coulombica típica en sistemas con aguas residuales complejas fluctúa entre el 20% y 50%, aunque sistemas controlados con sustratos simples pueden alcanzar eficiencias superiores.

En conclusión, aunque las MFC todavía enfrentan desafíos significativos en términos de eficiencia absoluta en comparación con tecnologías electroquímicas convencionales, ofrecen importantes ventajas como la producción simultánea de energía eléctrica y tratamiento de residuos orgánicos bajo condiciones ambientales moderadas. Esto las posiciona como una

alternativa sostenible prometedora en el marco de tecnologías energéticas renovables y economía circular.

2.2 *APLICACIONES DE LAS MFC ACTUALMENTE*

Las aplicaciones de la MFC hoy en día son:

Tratamiento de aguas residuales:

Los procesos de depuración y mantenimiento de aguas residuales hoy en día se basan principalmente en procesos de fangos activos debido a sus buenos resultados en tiempos de procesado bajos, los cuales presentan un elevado coste económico y energético. El coste de aeración de los procesos de fangos activos puede ascender al 75% de los costes de energía de la planta de aguas residuales (WWTP) mientras que el tratamiento y la eliminación de los fangos pueden ser de hasta el 60% de los costes de operación.(Gude, 2016)

Las MFC pueden ser usadas para tratar un gran número de residuos, y en teoría podrían llegar a disminuir considerablemente las necesidades energéticas de las plantas de tratamiento, además de disminuir la cantidad de fangos producidos, lo que lleva a un menor coste de disposición de ellos. Esta reducción se consigue debido a la fijación de biomasa a la superficie de las biopelículas.(Oh et al., 2010) De momento, no son implementadas en sistemas reales debido a dificultades técnicas, altos costes de capital y problemas de escalabilidad.

Valorización y tratamiento de contaminantes en aguas residuales

Las aguas residuales que contienen metales pesados requieren tratamientos avanzados ya que suelen ser contaminantes no biodegradables con un efecto tóxico al entorno y a la salud humana. Por lo que el tratamiento de estas aguas y la recuperación de los

metales reduciéndolos es una aplicación muy interesante de las MFCs.(Boas et al., 2022)

Para llevar a cabo este proceso, generalmente se emplean celdas de doble cámara, donde las aguas contaminadas se introducen en el compartimento catódico. Aquí, los compuestos metálicos presentes actúan como aceptores finales de electrones, reduciéndose a formas menos peligrosas o incluso precipitándose sobre el electrodo para su posterior recuperación. Aunque las MFC han logrado tasas interesantes en la recuperación de metales, este proceso puede potenciarse mediante el uso de una entrada externa de energía en forma de celdas de electrólisis microbiana (MEC), que facilitan un mayor flujo de protones a través de la membrana. Esta técnica integrada ofrece así una estrategia prometedora para tratar aguas contaminadas con metales pesados, reduciendo simultáneamente la carga contaminante y recuperando recursos valiosos de forma eficiente y sostenible.

Producción de biohidrógeno

Otra aplicación relevante derivada de las MFCs es la producción sostenible de hidrógeno, un combustible emergente con gran potencial para cubrir futuras demandas energéticas debido al agotamiento progresivo de los combustibles fósiles. Aunque existen distintos métodos para producir hidrógeno, como la electrólisis convencional, los procesos biológicos han adquirido especial relevancia en los últimos años por ser ambientalmente amigables y consumir menos energía.(Kadier et al., 2016)

Las MFC pueden adaptarse para producir hidrógeno en el cátodo, bien mediante una reacción química directa o empleando un biocátodo especializado. Estos sistemas modificados se denominan celdas de electrólisis microbianas (MEC) y requieren un aporte externo de energía, que sin embargo es considerablemente inferior a la energía generada por el hidrógeno producido. Asimismo, la energía necesaria para operar una MEC es significativamente menor que la requerida por sistemas electrolizadores convencionales. No obstante, actualmente presentan como principal limitación tasas de

producción de hidrógeno más bajas en comparación con estas tecnologías convencionales.

Además del hidrógeno, estos sistemas pueden emplearse para que los microorganismos utilicen el hidrógeno generado como intermediario en la reducción de dióxido de carbono (CO_2), produciendo compuestos químicos de alto valor añadido como acetato, metano, peróxido de hidrógeno, etanol y ácido fórmico. Esta variante se conoce como celda de electrosíntesis microbiana (MES), la cual todavía se encuentra en fase inicial de desarrollo y con amplios desafíos por superar.(Puig et al., 2017)

Biorremediación

Otra de las aplicaciones más interesantes de las MFC es en el tratamiento de grandes áreas de suelos, sedimentos, aguas subterráneas y superficiales. Aprovechando la población de microorganismos ya presentes son capaces de degradar los contaminantes en contaminantes menos dañinos. Debido a la menor generación de energía eléctrica que cuando están las MFC operando con aguas residuales, en biorremediación el foco está en esa disminución de la contaminación presente.(Boas et al., 2022) Las MFC permiten llevar a cabo simultáneamente reacciones de oxidación y reducción, actuando como sistemas capaces de eliminar contaminantes mediante su completa degradación. Diversos estudios han demostrado que las MFC pueden funcionar como dispositivos autosuficientes energéticamente en procesos de biorremediación, y reduciendo o eliminando grupos de contaminantes como pesticidas y herbicidas, hidrocarburos aromáticos o agentes fármacos.(Pisciotta & Dolceamore Jr, 2016)

Generación de energía eléctrica

Actualmente útil para alimentar sistemas eléctricos que requieren poca potencia, o donde las fuentes convencionales resultan imprácticas o costosas. Se han usado en relojes digitales, como fuente de alimentación de sensores como de temperatura(Khaled et al., 2016), como electrónica de baja potencia en nodos IoT o

llegando a alimentar microcomputadoras sin ningún circuito electrónico añadido.(Walter et al., 2020)

Además, en el campo de la robótica simbiótica, se destacan proyectos como el EcoBotIII, un robot con un sistema de digestión artificial que llegó a operar durante 7 días autónomamente siendo alimentado por MFCs. (Ieropoulos et al., s. f.) Estos avances confirman que las MFC representan una fuente energética viable para dispositivos de baja potencia, particularmente en aplicaciones ambientales, IoT y robótica simbiótica.

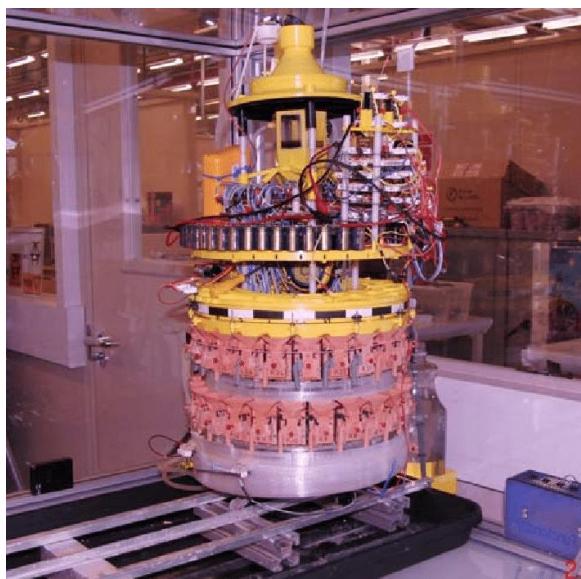


Figura 10 Ecobot III

Fuente (Ieropoulos et al., s. f.)

Desalinización

Otra aplicación de las MFC está en el ámbito de la desalinización. A partir de una MFC es posible crear una MDC, una celda de desalinización microbiana. Esta celda combina una celda de combustible microbiana (MFC) con un sistema de electrodiálisis. En estos sistemas, la energía requerida para el proceso de desalinización proviene directamente de la oxidación de materia orgánica. Esta tecnología permite alcanzar tasas de desalinización de hasta un 90%, produciendo agua dulce sin necesidad de energía

eléctrica externa más allá de la requerida por las bombas peristálticas empleadas en algunos diseños experimentales.(Borjas et al., 2017)

Las MDC presentarían múltiples ventajas respecto a tecnologías convencionales, como la reducción significativa en el consumo energético, ausencia de emisiones adicionales de gases de efecto invernadero, y la capacidad de realizar tratamiento simultáneo de aguas residuales y aguas salobres. Sin embargo, aún existen limitaciones significativas relacionadas con la resistencia interna, variaciones de pH que pueden afectar al crecimiento del biofilm y fenómenos como la difusión inversa de sales entre los compartimientos anódico y catódico y la cámara salina.(Boas et al., 2022)

A pesar de estos desafíos técnicos, las MDC se perfilan como una solución innovadora y prometedora en regiones con recursos hídricos limitados, abriendo la puerta hacia procesos de desalinización económicamente viables y ambientalmente sostenibles en el futuro.

Biosensores

Gracias a la capacidad de las MFCs de generar corriente en respuesta a fenómenos biológicos específicos se han empleado como sensores para la detección y análisis de contaminantes como metales pesados, ácidos grasos volátiles o la concentración de DBO₅. La técnica convencional para medir la DBO requiere aproximadamente cinco días para completarse; en cambio, los biosensores basados en MFC ofrecen una alternativa rápida, económica y precisa para realizar esta monitorización de forma online y en tiempo real.(Pasternak et al., 2017). Pese a los desafíos presentes como largos tiempos de aclimatación, baja sensibilidad, problemas de estabilidad y reproducibilidad de la señal. Las MFCs como biosensores constituyen una solución prometedora en la medición de parámetros de contaminación y ofrecen ventajas únicas como la monitorización en tiempo real, portabilidad y la capacidad de operar en áreas remotas como sistemas autónomos y sostenibles.

3.

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

Puesto que las MFC representan una tecnología emergente con un potencial significativo en la producción de energía renovable y el tratamiento de aguas residuales. A pesar de los avances realizados en los últimos años, su implementación a gran escala sigue siendo limitada debido a diversos factores críticos como la eficiencia energética, la capacidad de reducción efectiva de la demanda química de oxígeno (DQO), la viabilidad económica y la optimización tanto de materiales como de procesos operativos.

Este proyecto se justifica ampliamente desde dos dimensiones principales: técnica y de mercado.

Desde el punto de vista técnico, el desarrollo, la optimización y la implementación efectiva de las MFC pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental y a la autosuficiencia energética dentro del sector del tratamiento de aguas residuales. Las MFC permiten transformar la materia orgánica presente en las aguas residuales en energía eléctrica mediante procesos bioelectroquímicos. Esto ofrece una solución doblemente beneficiosa, ya que reduce considerablemente la dependencia de fuentes de energía convencionales externas, disminuye la huella de carbono de las plantas de tratamiento y contribuye activamente a la mitigación del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el desarrollo de estas celdas aprovecha el potencial energético contenido en las aguas residuales, que en condiciones normales no se aprovecha y simplemente se pierde en el proceso tradicional de tratamiento.

Por otra parte, desde la perspectiva del mercado, existe una creciente concienciación y sensibilización social sobre la importancia de la sostenibilidad, acompañada por una presión regulatoria cada vez mayor. Iniciativas internacionales como los Objetivos de

Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030 de la ONU, especialmente en el marco regulatorio de la Unión Europea, están ejerciendo una presión considerable sobre los gobiernos y las organizaciones para implementar tecnologías más limpias, eficientes y sostenibles. La aplicación de las MFC está perfectamente alineada con estos objetivos, ya que representa una alternativa viable que no solo contribuye a reducir la contaminación y la dependencia de combustibles fósiles, sino que también ofrece soluciones eficientes para revertir el daño acumulado en la biosfera. Además, la recuperación de recursos valiosos como el nitrógeno, fósforo y otros compuestos químicos contenidos en las aguas residuales proporciona una ventaja adicional, creando nuevas fuentes de ingresos potenciales y reduciendo la dependencia de recursos no renovables y costosos.

No obstante, la viabilidad económica de implementar las MFC aún presenta incertidumbres debido principalmente al alto coste inicial de instalación, las limitaciones tecnológicas actuales, la falta de infraestructuras adaptadas, y la necesidad de una mayor eficiencia en la producción energética. Estas incertidumbres representan, a su vez, una clara oportunidad para llevar a cabo investigaciones más profundas que permitan explorar con detalle su beneficio económico, especialmente mediante el desarrollo de soluciones técnicas más eficientes y económicas. La reducción de costes operativos mediante la optimización del uso de materiales económicos y sostenibles, como el uso innovador de madera en celdas sin membrana o alternativas más económicas como los puentes salinos, puede hacer que esta tecnología sea más accesible y rentable para el mercado.

En conclusión, este proyecto no solo tiene el potencial de avanzar en el camino de la tecnología de las celdas de combustible microbianas, sino que también podría abrir una vía de investigación en la mejora de las MFC, en el campo de las WMFC.

3.2 OBJETIVOS

Avanzar en la línea de investigación de las MFC, concretamente en las WMFC. Diseñar, construir y poner en marcha prototipos de WMFC (pino 10 mm y OSB-3 15 mm) y una MFC de doble cámara con puente salino. Comparar la eficacia de depuración mediante la reducción de DQO y comparar el desempeño eléctrico: tensión en circuito abierto, densidad de corriente y densidad de potencia bajo distintas resistencias externas— entre configuraciones y en función del HRT (24 h y 48 h).

Estudiar la viabilidad de las WMFC y proponer mejoras y líneas de investigación futura para escalar la tecnología o integrar materiales alternativos de bajo coste.

3.3 ALINEAMIENTO CON LOS ODS

El presente trabajo se enmarca en el desarrollo de tecnologías sostenibles aplicadas al tratamiento de aguas residuales y a la generación de energía renovable, contribuyendo de forma directa al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por Naciones Unidas. A través del estudio, diseño y experimentación con celdas de combustible microbianas (MFC).

Entre los ODS más directamente vinculados al proyecto destacan los siguientes:

- **ODS 6: Agua limpia y saneamiento.**

Las MFC representan una tecnología emergente con capacidad para degradar materia orgánica presente en aguas residuales mediante procesos biológicos, al tiempo que generan una corriente eléctrica. Esta dualidad permite abordar el saneamiento descentralizado, especialmente en contextos rurales o zonas con infraestructuras limitadas. La medición de la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en los ensayos realizados valida el potencial de estas tecnologías como solución viable para mejorar la calidad del agua, reduciendo simultáneamente la carga contaminante y el impacto ambiental del vertido.

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.**

El aprovechamiento directo de la energía química contenida en la materia orgánica del agua residual para generar electricidad convierte a las MFC en una alternativa de generación renovable, silenciosa y sin emisiones. Aunque los valores de densidad de potencia aún son bajos en comparación con otras tecnologías, la simplicidad constructiva y el bajo coste de los materiales empleados las hacen idóneas para aplicaciones a pequeña escala donde las soluciones convencionales no resultan viables. Este enfoque contribuye al desarrollo de sistemas energéticos distribuidos, resilientes y adaptados al entorno.

- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.**

La integración de tecnologías como las MFC en estrategias de gestión urbana sostenible permite recuperar recursos de corrientes residuales, promoviendo la autosuficiencia energética y la valorización de residuos. La posibilidad de construir los reactores a partir de materiales de bajo impacto ambiental, como la madera natural o el OSB 3 (un material derivado de residuos derivado de la industria maderera), refuerza el enfoque de economía circular y minimiza la huella de carbono asociada a la fabricación de equipos.

- **ODS 12: Producción y consumo responsables.**

El uso de componentes reciclados, no tóxicos y disponibles a nivel local en el diseño de MFC contribuye a una cadena de valor más sostenible. Además, el hecho de que estas tecnologías requieran bajo mantenimiento y funcionen con sustratos orgánicos de origen residual las posiciona como herramientas útiles en sistemas de tratamiento de bajo impacto ambiental y alta replicabilidad.

- **ODS 14 y 15: Vida submarina y vida de ecosistemas terrestres.**

Uno de los principales beneficios indirectos del uso de MFC es la mitigación de los efectos del vertido de aguas residuales sin tratar en ecosistemas acuáticos y terrestres. Al disminuir la carga orgánica y microbiológica de los efluentes, se reduce el riesgo de eutrofización, pérdida de biodiversidad, y degradación de

hábitats naturales. Su aplicación en entornos sensibles o zonas de amortiguamiento ecológico puede convertirse en una herramienta clave de conservación.

En conjunto, el desarrollo y análisis experimental de las MFC en avanza en el conocimiento científico y técnico de esta tecnología desde una perspectiva alineada con los ODS.

4. DISEÑO

4.1 COMPONENTES

4.1.1 ÁNODO

En el ánodo es la cámara anaerobia donde está el sustrato, la materia orgánica, los microorganismos y en ocasiones un mediador. La eficiencia de esta cámara depende de muchos factores (Yaqoob et al., 2021):

- El sustrato y los microorganismos, distintos microorganismos son más efectivos para determinados sustratos y en el objetivo de la MFC ya sea eliminar contaminantes o potencia eléctrica
- El área superficial del ánodo y la porosidad del material, una mayor superficie proporciona más sitios de generación de reacciones electroquímicas lo que desemboca en un mayor rendimiento de la MFC.
- Conductividad eléctrica, debe tener suficiente conductividad para asegurar el flujo correcto de electrones, minimizando la resistencia del electrodo aumentando así la potencia eléctrica.
- La biocompatibilidad, el material debe no ser tóxico para los microorganismos, inerte y compatible con el crecimiento y vida de los microorganismos.
- Estabilidad y durabilidad, al estar siempre en contacto con un medio acuoso la degradación que sufre el ánodo es esencial para la durabilidad y funcionamiento de la MFC
- Coste y disponibilidad del material, influye de gran manera en el diseño para realizar un diseño realizable

Commonly used materials as anode electrodes in microbial fuel cells (MFCs).

Electrode	Size of anode		Surface area of anode	Power efficiency
Anode material	Cathode material			
Carbon paper	Carbon paper	2.5 cm × 4.5 cm	22.5 cm ²	600 mW/m ²
Graphene oxide-CNT	Carbon cloth	-	-	434 mW/m ²
Graphene/Ppy	Carbon cloth	-	136 g/m ²	145 mW/m ²
Graphene powder/Polytetrafluoroethylene on carbon cloth	Carbon cloth	4 × 4 cm ²	-	0.329 mW/m ²
Carbon brush	-	Anode: length is 2.5 cm, diameter is 2.5 cm. Cathode: length is 1.7 cm, diameter is 1.3 cm.	16 cm ²	4.25 mW/m ²
Graphene coating on carbon cloth	Carbon cloth	Cathode: 4 cm × 4cm Anode: 1 cm × 2cm	4 cm ²	52.5 mW/m ²
N-doped graphene nanosheets (NGNS) on carbon cloth	Carbon cloth	1 cm × 1.5 cm	597 m ² /g	1008 mW/m ²
Zero-dimension nitrogen-doped carbon dots modification with carbon paper	Carbon paper	2.5cm ² × 2.5 cm ²	-	0.32 mW/m ²
Nickel foam/CNTs/PANI	Carbon cloth	-	1 cm ² of anode surface-area	113 W/m ³
Graphene oxide	Carbon paper	Cathode: 5 cm × 5 cm Anode: 2 cm × 1cm	-	102 mW/m ²
Carbon felt	Carbon fiber felt	2.5 × 2.5 cm	2.5 cm ²	784 mW/m ²
Polypyrrole/Graphene oxide	Carbon felt	3.0 cm × 2.0 cm × 0.5 cm	-	1326 mW/m ²
Graphene oxide modification with carbon paper	Carbon paper	5 × 3 cm ²	-	368 mW/m ²
Graphene/Au composite	Carbon paper	-	6 cm ²	508 mW/m ²
rGO/Ppy	Carbon paper	1 cm × 1.5 cm	-	1068 mW/m ²
rGO/SnO ₂ /Carbon cloth composite	Pt rode	3 cm × 2 cm	6 cm ²	1624 mW/m ²
Carbon cloth	Carbon cloth	2cm × 2cm	4 cm ²	679.7 mW/m ²
Polyaniline (PANI) networks onto graphene nanoribbons (GNRs)-coated on carbon paper (CP/GNRs/PANI)	Carbon paper	2cm × 2cm	4 cm ²	856 mW/m ²
RGO/Carbon cloth-PANI	Carbon felt	1.8 cm × 1.8 cm	-	1390 mW/m ²
r-GO sheets/Carbon cloth	Carbon cloth	-	4.5 cm ²	2.5 W/m ³
Graphene nanosheet coating on carbon paper	Carbon cloth	-	-	610.0 mW/m ²
Graphene 3D-Graphene	Carbon cloth	-	4 cm ²	2850 mW/m ²
Graphene	Carbon cloth	Anode: 30 mm × 5 mm (diameter × thickness)	9.41 m ²	1516 ± 87 mW/m ²
TiO ₂ and rGO composite	Carbon cloth	3 cm × 2cm	8 cm ²	1280 mW/m ²
Glassy carbon	Carbon fiber/brush	1 cm × 1 cm	Anode projected surface area 1 cm ²	3169 mW/m ²
Activated carbon cloth	Carbon cloth	Length is 1.7 cm and a diameter of 3.0 cm in cathode side and 1.8 cm in anode side	7 cm ²	1905 mW/m ²
Ti/TiO ₂	Pt meshes	2×4cm	1.5 cm ² in projected area	0.51 mW/cm ²
Titanium rod	Graphite felt	20 mm	20 ± 1 cm ²	2317 W/m ³
Titanium	-	2 cm × 2 cm	-	-

Tabla 1 Materiales comunes usados como ánodo en MFCs

Fuente (Yaqoob et al., 2021)

En esta tabla 1 podemos observar los materiales más comunes en el diseño de una MFC con sus superficies y su potencia eléctrica por m².(Yaqoob et al., 2020) Se observa como los materiales compuestos de carbono debido a su alta porosidad, superficie y conductividad eléctrica aceptable son comúnmente usados, pese a un comportamiento superior los metales como el titanio o el platino su alto coste perjudica su uso en MFCs.

Teniendo en cuenta estas propiedades se eligieron electrodos de tela de fibra de carbono y redondos de grafito, debido a su estructura grafítica altamente conductora e inmune a la corrosión, buena biocompatibilidad, así como a su estabilidad, durabilidad y coste asequible, factores que además garantizan una buena disponibilidad del material.

4.1.2 CÁTODO

El cátodo es el electrodo donde se produce la reacción de reducción, típicamente la reducción del oxígeno en presencia de protones y electrones para formar agua. Su rendimiento influye en la eficiencia global de la MFC. Las propiedades que debe tener el material y el diseño del electrodo deben ser:

- Alta capacidad catalítica, el electrodo actúa como catalizador para la reducción de oxígeno a agua por lo que una baja actividad catalítica implicará una menor tasa de transferencia de electrones, lo que reduce el voltaje generado por la MFC.
- Buena conductividad eléctrica, igual que en el ánodo una mayor conductividad un flujo de electrones más rápido, menores pérdidas óhmicas mayor eficiencia de MFC.
- El área superficial del ánodo y la porosidad del material, igual que en el ánodo.
- Estabilidad y durabilidad, otra vez igual que en el ánodo, resistencia a oxidación y corrosión.
- Coste y disponibilidad del material, influye de gran manera en el diseño para realizar un diseño realizable.

Igual que en el ánodo el platino y otros metales son muy eficaces, pero de alto coste por lo que el uso de compuestos de carbono es generalizado también en el cátodo, en las MFCs utilizadas en los ensayos se utilizan los mismos materiales para el cátodo que los que se mencionaron en el ánodo.

4.1.3 MEMBRANA DE INTERCAMBIO IÓNICO / PUENTE SALINO

Es la separación entre las dos cámaras por la que los protones H^+ fluyen de una cámara a otra minimizando la difusión de oxígeno y CO_2 del cátodo al ánodo y evitando la mezcla de efluentes (Palanisamy et al., 2019) . Las propiedades más buscadas en estas membranas/puentes serían:

- Alta conductividad protónica, la membrana debe permitir el mayor flujo de protones H^+ posible, ya que, si no llegan los protones a la cámara catódica, el oxígeno no puede reducirse en agua y se forma un cuello de botella.
- Baja permeabilidad a oxígeno y compuestos orgánicos, minimizar la difusión de oxígeno para asegurar que el ánodo sea el aceptor final de electrones y no compita con el oxígeno, evitar la mezcla de sustrato/efluente para no contaminar la cámara catódica y no perder sustrato útil en la anódica.
- Buena estabilidad térmica y química, la degradación de la membrana debe ser mínima en base a los factores por los que se puede ver afectado como pH, temperatura, presencia de metales pesados, ácidos o bases formados en el sustrato, etc. Si no es estable el funcionamiento de la MFC es comprometido y debe ser reemplazada.
- Coste y disponibilidad, influye de gran manera en el diseño para realizar un diseño realizable.

Destaca el uso mayoritario de membranas comerciales de Nafion® (PEM), aunque se investiga en biopolímeros modificados y otras estructuras porosas adecuadas.

(Huang et al., 2021)

Debido a su alto coste se decidió no usar membrana de intercambio iónico y optar por un puente salino debido a su considerablemente menor coste y mayor facilidad de construir.

4.1.4 REACTORES

Deben contener los electrodos y el medio acuoso para que se desarrollen los procesos biológicos y electroquímicos necesarios. Debe permitir un buen contacto del electrodo con el medio, facilidad de recolección de datos, evitar fugas y tener buena disponibilidad y bajo coste. Materiales comúnmente usados son acrílico, vidrio o polipropileno.

Eleción de materiales para el contenedor de la WMFC

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de diferentes materiales como medio de difusión protónica en celdas tipo Wood Microbial Fuel Cell (WMFC), se seleccionaron dos configuraciones constructivas basadas en madera con propiedades complementarias: madera maciza de pino y tablero OSB 3, cada uno con espesores distintos.

Madera de pino (10 mm)

Se empleó madera maciza de pino, especie resinosa de amplia disponibilidad, por su alta porosidad natural y buena permeabilidad al agua, propiedades que facilitan la difusión de protones desde el ánodo hacia el cátodo exterior, en ausencia de membrana. El pino ha sido previamente validado como uno de los materiales con mejor rendimiento bioeléctrico en la literatura. Se optó por un espesor de 10 mm, al considerar que ofrece un buen equilibrio entre rigidez estructural y eficiencia en el transporte de carga iónica.

Tablero OSB 3 (15 mm)

El tablero OSB 3 (Oriented Strand Board) fue seleccionado como alternativa reciclada y de bajo coste. Está formado por virutas de madera orientadas y unidas con resinas fenólicas de baja emisión (certificación E1), lo que le confiere resistencia estructural y durabilidad frente a la humedad. Aunque su porosidad es menor que la de la madera maciza, presenta una humectabilidad suficiente para permitir el paso de protones cuando

se mantiene en contacto constante con el ánodo y el sustrato. El espesor de 15 mm fue elegido por su disponibilidad para asegurar estabilidad dimensional durante ensayos de varios días.

Elección de materiales para los reactores de la MFC de doble cámara

Se optó por emplear contenedores de vidrio reciclado con tapa roscada como cámaras anódica y catódica en la configuración de MFC de doble cámara. Fueron recuperados de la industria alimentaria por su amplia disponibilidad y coste 0 de adquisición. Esta MFC es en la que se tiene un mayor control de las condiciones de operación por lo que un material transparente es ideal para este tipo de ensayos, además de su alta resistencia química y biológica.

4.1.5 CIRCUITO EXTERNO

El circuito externo debe estar compuesto por un cableado de resistencia baja con un potenciómetro para extraer la energía un voltímetro y un amperímetro. Deberían de minimizarse las pérdidas por resistencia y proteger de cortocircuitos y corrosión.

4.2 DISPOSICIÓN

Una vez considerados los componentes es necesario definir la disposición de la MFC, el principal problema al que la tecnología es su escalabilidad principalmente al elevado coste de las membranas de intercambio de protones las cuales se han calculado en el 62.5% del coste monetario total de una MFC (Palanisamy et al., 2019).

Debido a esto los diseños propuestos van a ser aquellos en los que esta membrana, comúnmente de Nafion^R o PEM comerciales no estén presentes. El alto coste de estas membranas, las del orden de Nafion 11X oscilan entre 0,18 y 0,22 euros/cm² lo cual equivale a que una sección de 100x100 cm asciende a un precio de entre 1800 y 2200 euros hacen inviable la escalabilidad de estas.

En estos diseños sin membrana se van a estudiar dos ramas: la MFC de una sola cámara, en la que no hay membrana de intercambio y la MFC de puente salino(Khan et al., 2012), en la que la membrana de intercambio se sustituye por un puente salino por el que los protones H^+ son intercambiados.

4.3 MFC DE UNA CÁMARA

Las celdas de una cámara como su nombre indica están compuestas por una sola cámara en la que se encuentra el sustrato, el ánodo en condiciones anaerobias y el cátodo en contacto tanto con la cámara como con el aire.

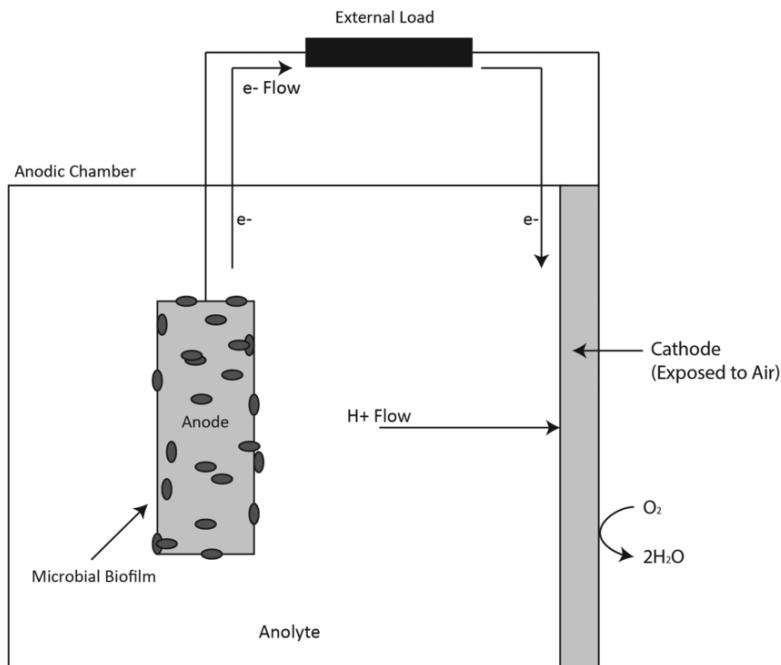


Figura 11 Diseño típico de una MFC de cámara única

Las ventajas de estas MFCs sobre las de doble cámara son: la simplicidad de diseño, al no requerir membrana ni puente salino su construcción es más directa, compactas y más eficientes en cuanto al espacio (ocupan menos volumen por unidad de energía generada.), coste de construcción y mantenimiento considerablemente más bajos (menor número de componentes, se elimina una gran parte del coste de membrana y menor

riesgo de obstrucciones al no haber membrana). Facilidad de operación, al ser una sola cámara son menos variables que controlar y menos requerimientos técnicos y requieren de menos intervención humana para mantener el sistema.(Bhaduri & Behera, 2024)

Sin embargo, estas celdas presentan también desafíos como la posible intrusión de oxígeno en la zona anódica, lo que puede afectar la eficiencia de los microorganismos electrogénicos, y problemas de biofouling en el cátodo, especialmente en configuraciones membrana-libre.

Dentro de las MFC de una cámara una variante reciente ha sido la WMFC esto es Wood Microbial Fuel Cell, una celda de combustible microbiana de madera que aprovechando la capacidad humectante de la madera para alcanzar estabilidad operacional. La idea consiste en tener una cámara de madera, trabajando en condiciones anaerobias donde se encuentra el ánodo mientras el cátodo este envuelto en su exterior.(Tahir et al., 2024)

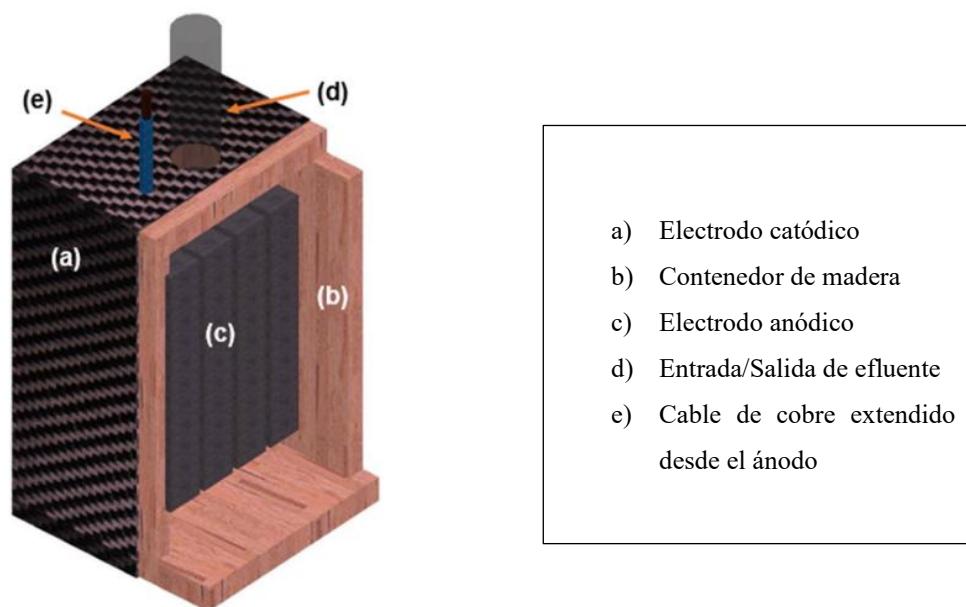


Figura 12- WMFC

Fuente (Tahir et al., 2024)

Estudios recientes han demostrado que este diseño aporta varios beneficios adicionales:

- Protección del cátodo frente a la biocorrosión y formación de biofilm, aumentando la durabilidad del sistema.(Tahir et al., 2024)
- Reducción del coste total: al eliminar las membranas de Nafion se mejora la escalabilidad.
- Estabilidad operativa mediante la autorregulación de la humedad: especialmente en maderas como el pino, con una eficiencia de remoción de DQO de hasta el 48% y una tensión en circuito abierto de hasta 551 mV.(Tahir et al., 2024)

No obstante, el diseño WMFC también implica desafíos técnicos como la pérdida diaria de agua por difusión a través de las paredes de madera (hasta un 20%/día en pino), y la variabilidad en resultados eléctricos según el tipo de madera utilizado.

En resumen, las MFC de una sola cámara y en particular las WMFC representan una opción muy prometedora para el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales sostenibles y de bajo coste, aunque aún se requiere investigación para optimizar su rendimiento eléctrico y asegurar su durabilidad a largo plazo en condiciones reales de operación.

4.4 MFC DE DOBLE CÁMARA POR PUENTE SALINO

Las celdas de combustible microbianas de doble cámara son uno de los diseños más estudiados en el ámbito de la bioelectroquímica, debido a su capacidad para mantener ambientes diferenciados entre el ánodo y el cátodo. Este tipo de MFC está compuesto por dos compartimentos separados (anódico y catódico), conectados mediante una membrana de intercambio iónico o, en versiones de bajo coste, mediante un puente salino.

En el caso del diseño con puente salino, este actúa como medio para el intercambio de protones (H^+) entre ambas cámaras, reemplazando la función de una membrana comercial como el Nafion®. El puente salino se fabrica típicamente con una solución de

agar-agar y una sal disuelta (como NaCl, KCl o KNO₃) contenida en un tubo hueco de material inerte, como silicona o PVC.

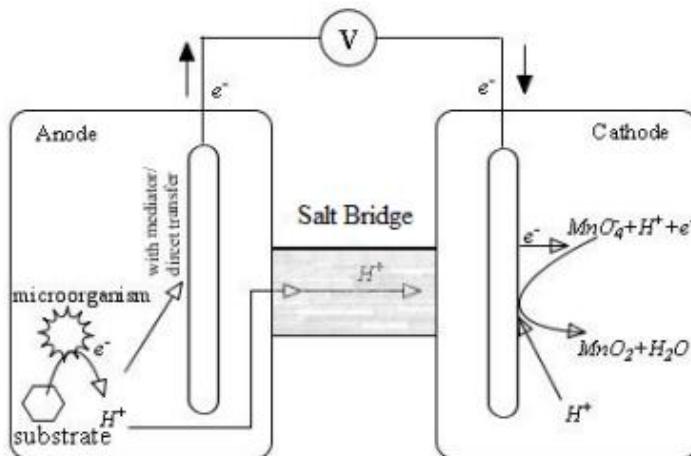


Figura 13 Esquema de MFC de puente salino

Fuente (Khan et al., 2012)

Las ventajas de este diseño sobre las de una sola cámara son las siguientes:

- Separación efectiva de ambientes redox: al estar físicamente separadas, la cámara anódica puede mantenerse anaerobia mientras que la catódica se aísla para permitir la reducción de oxígeno.
- Coste significativamente menor: el puente salino es fácil de fabricar con materiales económicos y accesibles, lo que reduce de forma drástica el coste total del sistema respecto a las membranas comerciales.

No obstante, este tipo de MFC también presenta limitaciones:

- Mayor resistencia interna debida a la longitud del puente y a la menor conductividad iónica en comparación con membranas sintéticas.
- Pérdida de rendimiento a largo plazo por fouling o disolución del gel de agar con el paso del tiempo

- Posible difusión cruzada de especies químicas, aunque en menor grado que en diseños totalmente abiertos.

Estudios experimentales han demostrado que la composición y proporción del puente salino influyen significativamente en el rendimiento. Por ejemplo, se ha observado que un 12% de agar con 3M de NaCl permite alcanzar tensiones máximas de hasta 337 mV y eficiencias de eliminación de DQO superiores al 64%. (Singh & Dharmendra, 2020) Asimismo, el tipo de sal utilizada impacta en el potencial generado: NaCl ha demostrado ser más eficiente que KCl en configuraciones similares.

En definitiva, las MFC de doble cámara con puente salino representan una solución intermedia entre la simplicidad de los diseños de una sola cámara y la eficiencia controlada de sistemas con membranas comerciales. Su bajo coste y buena capacidad de separación iónica las convierten en una opción muy útil en contextos de investigación o como tecnologías de transición hacia soluciones más sofisticadas.

El objetivo de este trabajo de laboratorio es de probar distintas configuraciones de MFC y recabar sus resultados, así como la dificultad de montaje y accesibilidad a la celda, su precio, escalabilidad, degradación de materia orgánica y densidad de potencia.

Para ello construiremos dos prototipos uno de una MFC de doble cámara por puente salino en el que probaremos con distintos electrodos y resistencias externas y una nueva iteración de WMFC de pino y conglomerado optimizando su funcionamiento.

5. MONTAJE Y OPERACIÓN DE LAS MFC

5.1 MFC DE DOBLE CÁMARA CON PUENTE SALINO

Materiales

- Botes de cristal (750 ml)
- Barras de grafito ($\varnothing 1 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)
- Tubo corrugado (para puente)
- Agar-agar (2–3 g)
- Sales: NaCl, KCl, KNO₃ (0.5 g)
- Agua destilada
- Fango anaerobio y agua residual
- Cables de cobre, silicona, cinta aislante
- Voltímetro y potenciómetro
- Pequeño soldador eléctrico
- Arandela y tornillo (circuito eléctrico)

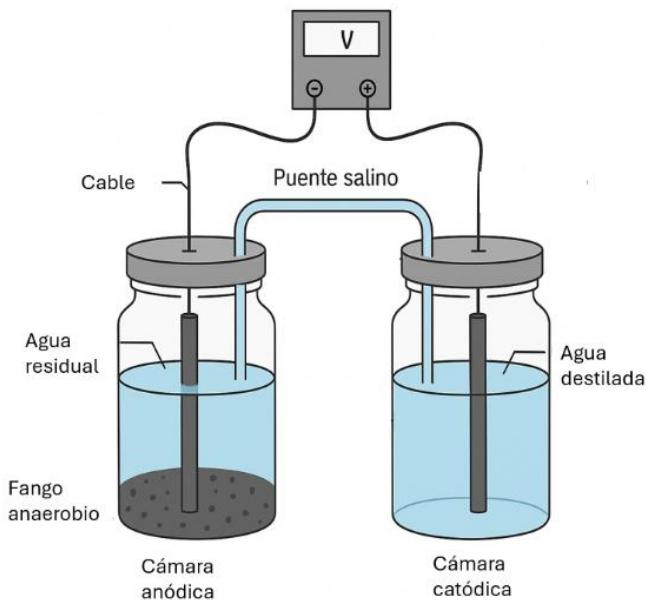


Figura 14 Esquema doble cámara puente salino

Diseño y montaje

El montaje de la MFC de doble cámara con puente salino se basa en la utilización de dos contenedores de vidrio reciclados (750 ml), cada uno actuando como cámara anódica y catódica, respectivamente. Las tapas de plástico de los frascos se perforan cuidadosamente con un soldador eléctrico de punta fina (podría hacerse con taladro) para permitir el paso de los cables de conexión a los electrodos y del tubo que conforma el puente salino.

El puente salino, previamente preparado con agar-agar y sal, se introduce entre ambas cámaras, asegurando que sus extremos queden completamente sumergidos en el líquido de cada compartimento para permitir el intercambio de protones.

Los electrodos de grafito se insertan por los orificios y se fijan con silicona caliente para evitar fugas y mantener condiciones estancas entre las cámaras. En la cámara anódica se introduce fango anaerobio como fuente de bacterias electrogénicas, y se completa con agua residual hasta unos tres cuartos de su capacidad. En la cámara catódica se añade únicamente agua destilada. Ambos electrodos se disponen de manera que su parte superior queda fuera del líquido para prevenir la corrosión del cobre en las conexiones eléctricas.

Se probarán distintas configuraciones con este diseño para compararlas con las WMFC y evaluar su rendimiento relativo en términos de generación eléctrica y eficiencia de tratamiento.

Consideraciones técnicas

- Conexiones eléctricas: evitar la corrosión del cable de cobre, se deberá evitar sumergir el cable y aislar bien las uniones con cinta aislante y silicona caliente para evitar cortocircuitos por condensación o salpicaduras.
- El uso de materiales reciclados hace que esta configuración sea ecológicamente favorable y económicamente accesible.



Figura 15 MFC de doble cámara de los ensayos

En la cámara anódica se introduce el fango anaerobio se coloca el electrodo y se llena con agua residual hasta unos tres cuartos de altura y se rosca la tapa herméticamente. El volumen de líquido de esta MFC fue de unos 500 mL por cámara.

5.2 WOOD MICROBIAL FUEL CELL (WMFC)

Materiales

- Caja de madera (pino/OSB 3) con tapa
- Tela de fibra de carbono
- Fango anaerobio
- Agua residual
- Agua destilada
- Cables de cobre, cinta aislante, silicona
- Voltímetro y potenciómetro

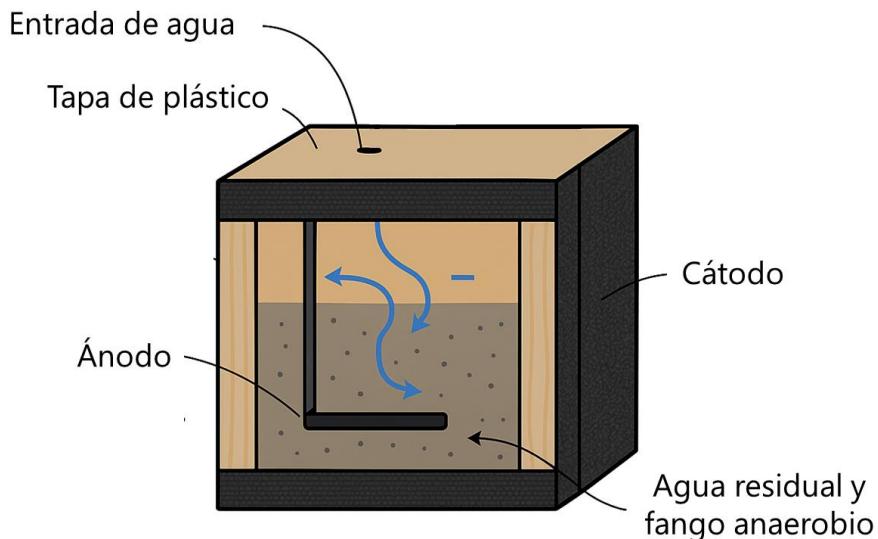


Figura 16 Esquema WMFC

Montaje

Primero se construye un cubo de madera de medidas interiores de 5x5x5 cm.

El montaje consiste en una única cámara donde se introduce el **fango anaerobio** y el electrodo anódico, que permanece en contacto directo con el sustrato. El cátodo, por su parte, se instala en contacto con la cara externa de la madera, aprovechando el contacto con el oxígeno atmosférico para facilitar la reacción de reducción. Es crucial que parte del electrodo permanezca fuera del medio líquido para evitar la corrosión del cobre y preservar el circuito eléctrico.

La permeabilidad de la madera permite el intercambio limitado pero efectivo de protones entre las zonas interna y externa, lo que hace innecesario el uso de membranas de intercambio protónico (PEM). Este diseño compacto, sostenible y de bajo coste no requiere perforaciones complejas ni puentes salinos, en comparación con el otro diseño.

Se construirán dos cámaras análogas una de madera de pino y otra de conglomerado y se compararán su eficiencia, entre ellas y con las otras cámaras. Se escoge madera de pino debido a su alta disponibilidad y los indicios de mayor rendimiento en la literatura.(Tahir et al., 2024) Y conglomerado debido a su prominencia como material reciclado y de economía circular.

En esta nueva iteración se estudia la inclusión de tapas de plástico en los extremos superior e inferior para evitar la necesidad de reposición de líquido cada poco tiempo y obtener un mayor rendimiento

Montaje paso a paso

1. Preparación de la cámara: Se selecciona una caja de madera, asegurando su estanqueidad, pero sin sellar sus poros internos.
2. Perforación de tapa: Con un soldador eléctrico se realizan orificios en la tapa para el paso de los cables eléctricos.
3. Instalación del ánodo: Se introduce el electrodo en contacto con el fango anaerobio en el fondo de la cámara, asegurando que quede sumergido.
4. Instalación del cátodo: Se fija el cátodo en la parte exterior de la caja, en contacto con el aire y alineado frente al ánodo (a través de la pared de madera).
5. Conexiones eléctricas: Se conectan los cables de cobre a los electrodos y se aísla con cinta y silicona caliente para evitar cortocircuitos.
6. Cierre y sellado: Se cierra la tapa con firmeza para mantener condiciones anaerobias y se sella con silicona si fuera necesario.

7. Medición: Una vez establecida la biopelícula en el ánodo (~5-7 días), se conecta a un potenciómetro o voltímetro para registrar la producción eléctrica.



Figura 17 Cámara de las WMFCs de los ensayos

Consideraciones técnicas

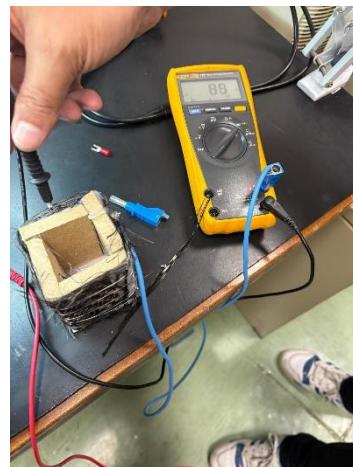
- Conexiones eléctricas: evitar la corrosión del cable de cobre, se deberá evitar sumergir el cable y aislar bien las uniones con cinta aislante y silicona caliente para evitar cortocircuitos por condensación o salpicaduras.
- La madera usada debe mantenerse constantemente humectada para permitir el paso de protones.
- La porosidad natural puede variar según la especie, lo cual afecta directamente a la eficiencia de la celda.
- El uso de materiales reciclados hace que esta configuración sea ecológicamente favorable y económicamente accesible.
- Colocación y conexión adecuada de electrodos, voltímetro y resistencias variable.

Las conexiones eléctricas se han realizado mediante cables multifilares de cobre con terminales de tornillo y arandela asegurando el contacto entre los electrodos y los cables. Se reforzó con pegamento termofusible para asegurar y estabilizar la conexión.



Figura 18 Conexión cátodo exterior

Posteriormente se comprobó la conductividad de ambas WMFC mediante un multímetro para asegurar el correcto funcionamiento durante los ensayos



*Figura 19 Comprobación conductividad
WMFC 1*

6. **METODOLOGÍA ENSAYO**

6.1 VARIABLES DE CONTROL

En cuanto a los tiempos de retención se estudiará un tiempo de retención hidráulico (HRT) de 24 y 48 horas que coincide con el tiempo de retención de sólidos (SRT) ya que estos diseños de celda de combustible microbiana se consideran de cultivo fijo en las que se intenta no eliminar una gran cantidad de la biocenosis en el cambio de agua residual.

Se controlará el pH a lo largo de los ensayos de manera que un pH entre 6,5 y 7,5 es mantenido para tener el mejor rendimiento posible de los microorganismos

La digestión anaerobia de los microorganismos ocurre entre temperaturas de 18 °C a 40 °C, pese a que está comprobado en el tratamiento de aguas que la temperatura óptima se encuentra alrededor de los 30 grados centígrados, debido al sobrecoste que puede suponer calentar el agua a estas temperaturas sobre todo en invierno se intentará que el funcionamiento de los ensayos se realice entre una temperatura ambiente de 22 y 28 grados centígrados.

El sustrato se formará a partir de agua residual urbana de una EDAR municipal de tamaño medio en la Comunidad de Madrid y se impulsará inicialmente con sacarosa para suministrar a los microorganismos de una fuente de carbono y asegurar un rendimiento óptimo.

6.2 *OBJETIVOS DEL ENSAYO*

El presente ensayo busca evaluar el rendimiento eléctrico y la capacidad de reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en celdas de combustible microbianas (MFC). Se estudiarán específicamente tiempos de retención hidráulica (HRT) de 24 y 48 horas para analizar la influencia del tiempo en la eficiencia energética y en la degradación de materia orgánica.

6.3 *MATERIALES UTILIZADOS*

- Agua residual urbana
- Fango anaerobio de plantas de tratamiento de aguas urbanas
- Resistencias (entre 250-450 kΩ)
- Voltímetro
- Resistencia variable de décadas (1 Ω- 1MΩ)
- Espectrofotómetro Spectroquant® Prove 100
- Kits Spectroquant® COD Test (método fotométrico)
- Digestor térmico Spectroquant®
- Tubos de ensayo COD (comerciales Spectroquant®)

6.4 *PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL*

6.4.1 *PREPARACIÓN DEL SUSTRATO*

Descripción del sustrato

Se obtuvo el sustrato de la planta de tratamiento de aguas residuales de tamaño medio Viveros de la Villa Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid.

Preparación del sustrato enriquecido con sacarosa:

Para garantizar condiciones iniciales óptimas y favorecer el crecimiento de los microorganismos electrogénicos, se preparó una solución acuosa utilizando 2000 ml de agua residual urbana, enriquecida con sacarosa como fuente adicional de carbono fácilmente metabolizable. Se añadieron 0,8 g de sacarosa directamente al agua residual y se homogenizó manualmente hasta la completa disolución del azúcar. Posteriormente, se procedió a la medición inicial de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante el método fotométrico Spectroquant® COD Test, utilizando el espectrofotómetro Spectroquant® Prove 100 según las especificaciones proporcionadas por el fabricante (véase Anexo). La determinación de la DQO inicial permite evaluar posteriormente la eficiencia del tratamiento al comparar con las mediciones finales tras los períodos establecidos de ensayo (24 y 48 horas).

6.4.2 PRUEBA PILOTO

Con el objetivo de verificar la presencia de bacterias electrogénicas en el fango anaerobio y comprobar la viabilidad del diseño experimental, se llevó a cabo una prueba piloto preliminar empleando la MFC de doble cámara conectada mediante un puente salino. Este ensayo buscaba evaluar de manera cualitativa la formación de biopelícula sobre el ánodo y la generación de diferencia de potencial como indicativos del metabolismo electrogénico de los microorganismos.

Se utilizó como sustrato el sustrato preparado previamente y al cabo de 72 horas se alcanzó un valor estable de 320-325 mV de tensión en circuito abierto (OCV).

Tras la prueba piloto exitosa, se acondicionaron todas las celdas durante 7 días para desarrollo de biopelícula y posteriormente se iniciaron los ensayos comparativos bajo un rango térmico de 22 – 28 °C y pH 6,5-7,5.

Los resultados de esta prueba piloto confirmaron la existencia de bacterias capaces de transferir electrones al electrodo y validaron la funcionalidad del montaje de doble cámara con puente salino para futuros ensayos comparativos. A raíz de esta validación, se procedieron con los experimentos, dejando un par de días para la formación y estabilización de la biopelícula.

parametrizar

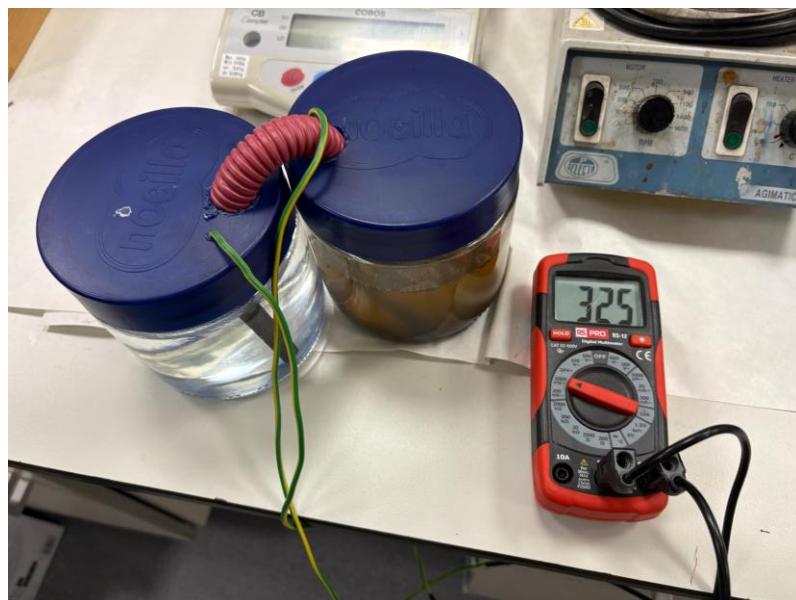


Figura 20 Prueba Piloto

7. RESULTADOS

7.1 MEDICIONES ELÉCTRICAS

Registro del voltaje generado durante los ensayos utilizando voltímetro digital. En primera instancia se hizo una estimación inicial de la resistencia interna total de las MFC con la ecuación: (Logan et al., 2006)

$$R_i = R_{ext} \frac{OCV - V_r}{V_r}$$

Derivada de la Ley de Ohm simplificada y la medición de la tensión exterior y su relación con la intensidad de corriente:

$$OCV = I (R_i + R_{ext})$$

$$V_r = I * R_{ext}$$

Donde OCV es la tensión del circuito abierto, Ri es la resistencia interna de la celda y Vr la tensión estabilizada de la celda conectada a esa resistencia exterior

Es importante distinguir entre la resistencia interna de la celda (R_i) y la resistencia externa aplicada (R_{ext}) durante las mediciones. La resistencia interna representa el conjunto de impedancias presentes en el interior del sistema, incluyendo las pérdidas óhmicas del electrolito, el material separador, los electrodos, así como resistencias asociadas al transporte iónico y fenómenos de polarización. Esta resistencia condiciona el rendimiento bioelectroquímico de la MFC. Por otro lado, la resistencia externa es un componente del circuito eléctrico que se conecta para evaluar el comportamiento de la celda y calcular la

potencia generada, habitualmente seleccionada para aproximarse al valor de R_i y así maximizar la transferencia de potencia.

Luego para acercarnos con exactitud a los valores graficamos la curva tensión-resistencia ($V-R$), que consiste en registrar la tensión de salida (V) de la celda frente a distintos valores de resistencia externa (R_{ext}) aplicados.

Cuando la resistencia externa es muy elevada (circuito abierto), la celda alcanza su tensión máxima (OCV, “open circuit voltage”), pero la corriente es prácticamente nula y no se obtiene potencia útil. A medida que se disminuye la resistencia externa, se facilita el paso de corriente, pero la tensión registrada en los terminales de la celda disminuye progresivamente, debido a la caída de potencial asociada a la resistencia interna del sistema. Si la resistencia externa es demasiado baja, la tensión cae considerablemente y la corriente se limita por la propia capacidad de la celda. Este punto de la resistencia interna coincide también con la condición de máxima transferencia de potencia mencionada previamente según la ley de Ohm.

Las curvas muestran cómo la tensión de salida varía al aumentar la resistencia externa (R_{ext}) desde valores bajos (próximos a cortocircuito) hasta valores elevados (circuito abierto). Se observa que, a bajas resistencias externas, la tensión de salida es baja, debido a que la corriente que circula es máxima y la caída de potencial sobre la resistencia interna de la celda es significativa. A medida que la resistencia externa aumenta, la tensión registrada crece de forma asintótica, aproximándose a la tensión en circuito abierto (OCV),

OCV

RESISTENCIA (Ω)	V MFC 1 (mV)	V WMFC 2 (mV)	V WMFC 3 (mV)
OCV MAX	446	168,3	114

Tabla 2 Tensión pico tras 24 H

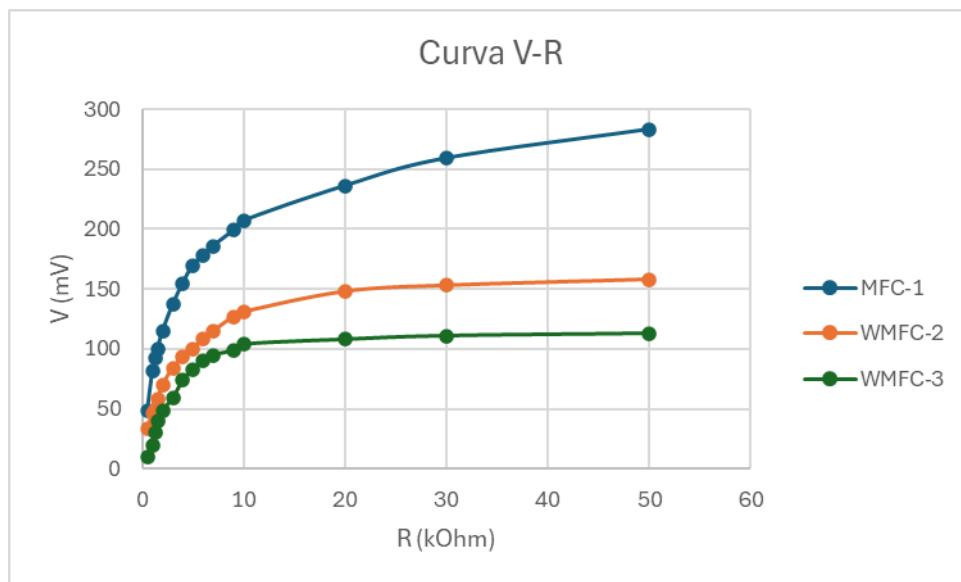


Figura 21 Curva V-R MFC

La figura presentada muestra las curvas de tensión en función de la resistencia externa (V-R) obtenidas para las tres configuraciones de celdas de combustible microbianas (MFC).

MFC-1: Doble cámara con puente salino

WMFC-2: Wood Microbial Fuel Cell (WMFC) con madera de pino

WMFC-3: WMFC con OSB 3

Para resistencias bajas (cercanas al cortocircuito), la tensión de salida es reducida, ya que la corriente es elevada y la mayor parte de la caída de potencial ocurre en la resistencia interna de la celda. Al aumentar la resistencia externa, la tensión registrada en bornes crece progresivamente, acercándose asintóticamente al valor de tensión en circuito abierto (OCV), que representa el máximo teórico de la celda sin extracción de corriente.

MFC-1 (puente salino):

Presenta la mayor tensión en circuito abierto ($OCV = 446 \text{ mV}$) y mantiene valores de tensión superiores para cualquier resistencia externa respecto a las WMFC. Esto se debe a la mejor separación fisicoquímica entre los compartimentos anódico y catódico, que minimiza las pérdidas por difusión y la competencia por aceptores de electrones. Sin embargo, en el análisis de potencia, esta celda requiere resistencias externas más bajas (en torno a $1\text{--}2 \text{ k}\Omega$) para alcanzar su máximo, lo que indica una menor resistencia interna efectiva en comparación con las WMFC, pese a la mayor resistencia iónica que introduce el puente salino. Esta diferencia se explica porque el resto de los elementos del sistema (superficie efectiva de los electrodos, conductividad del sustrato, volumen, etc.) favorecen una mayor transferencia de carga en esta configuración.

WMFC-2 (pino):

La celda WMFC de pino muestra una OCV intermedia (168 mV). La curva evidencia un incremento de tensión más paulatino conforme aumenta la resistencia externa, situándose por debajo de la MFC-1 en todo el rango, aunque mantiene una diferencia apreciable respecto a la WMFC de OSB. En este caso, la resistencia interna total del sistema es más elevada, reflejando las limitaciones impuestas por el espesor y la porosidad de la madera, así como una menor superficie de contacto efectivo entre electrodos y electrolito. A pesar de esto, la WMFC de pino permite la extracción de mayor corriente bajo resistencias elevadas, lo que se traduce en una potencia específica superior a la de OSB y, en determinadas condiciones, comparable a la MFC de doble cámara.

WMFC-3 (OSB 3):

La configuración basada en OSB 3 obtiene la menor OCV (114 mV) y su curva permanece en todo momento por debajo de las otras dos configuraciones. La baja conductividad y menor porosidad del material, junto con el espesor superior respecto al pino, limitan la eficiencia del transporte protónico, incrementando la resistencia interna y disminuyendo la densidad de corriente. En consecuencia, requiere resistencias externas incluso mayores para alcanzar el máximo de potencia, lo que pone de manifiesto sus limitaciones a nivel electroquímico.

Cálculo de la potencia mediante la ecuación:

$$\text{Potencia } (P) = \frac{\text{Voltaje } (V)^2}{\text{Resistencia } (R)}$$

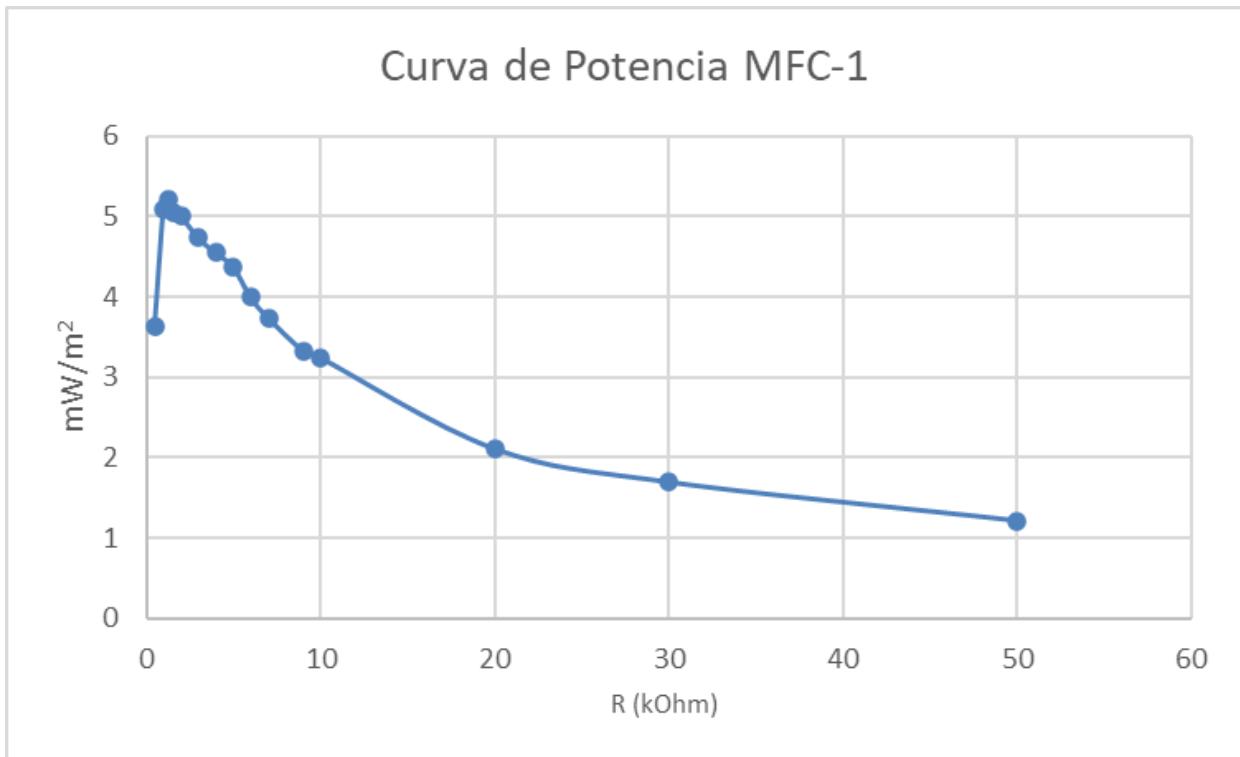


Figura 22 Curva Potencia MFC-1

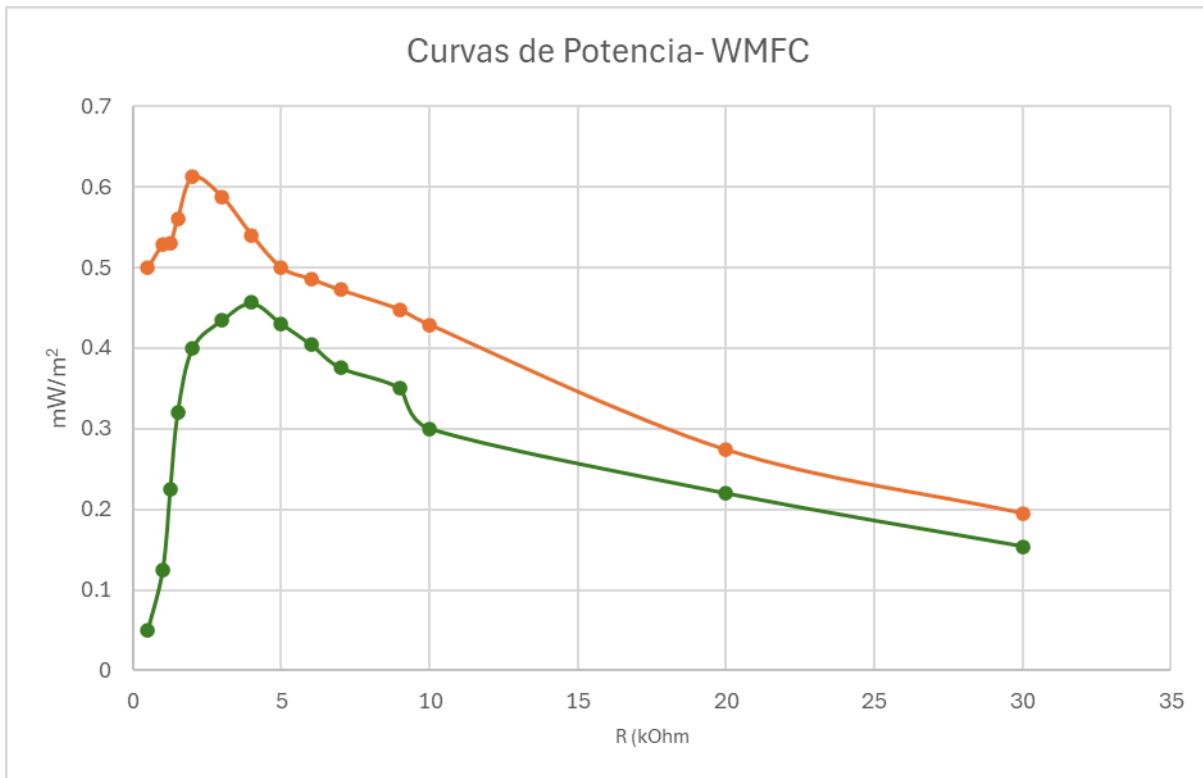


Figura 23 Curva Potencia WMFC-2 y WMFC-3

Curva de potencia:

MFC-1 (doble cámara, azul): Potencia máxima: $5,11 \text{ mW/m}^2$. Resistencia óptima: $1,25 \text{ k}\Omega$. Se observa un máximo claro de potencia en torno a $1,25 \text{ k}\Omega$, de resistencia externa, con un valor máximo de $5,1 \text{ mW/m}^2$ que decrece progresivamente tanto hacia resistencias más bajas como más altas, este valore coincide con las densidades de potencia típicas en la literatura. Para resistencias bajas, la corriente es alta pero la tensión cae rápidamente, limitando la potencia útil. Y para resistencias elevadas, aunque la tensión se acerca al valor máximo (OCV), la corriente es muy baja, por lo que la potencia vuelve a decrecer. El máximo se alcanza para una resistencia externa relativamente baja, lo que indica una resistencia interna global más baja en comparación con las celdas de madera. Esta configuración, gracias a la mejor separación fisicoquímica entre cámaras y una mayor

superficie efectiva de electrodos, permite una transferencia más eficiente de carga, resultando en una entrega de corriente superior bajo carga.

WMFC-2 (pino, naranja): Potencia máxima: $0,61 \text{ mW/m}^2$. Resistencia óptima: $2 \text{ k}\Omega$. La WMFC de pino alcanza su máximo de potencia para una resistencia mayor que la MFC-1, reflejando una mayor resistencia interna. El valor de potencia máxima es notablemente inferior al de la celda de doble cámara e inferior al alcanzado en otros estudios en la literatura por lo que podemos inferir que el prototipo no está debidamente optimizando dejando mucho margen para mejora principalmente debido a la rápida difusión del agua, y la imposibilidad de reponerla a la velocidad adecuada. Pese a todo la potencia alcanzada por esta WMFC de pino es claramente superior al de la WMFC de OSB 3, debido a su mayor porosidad y menor espesor de pared. Esto evidencia que, aunque la madera de pino permite cierta difusión protónica y por tanto funcionamiento sin membrana, sus limitaciones estructurales y de conductividad impactan de manera significativa en el rendimiento eléctrico.

WMFC-3 (OSB 3, verde); Potencia máxima: $0,46 \text{ mW/m}^2$. Resistencia óptima: $4 \text{ k}\Omega$. En el caso del OSB 3, el máximo de potencia se alcanza para una resistencia todavía mayor, lo que indica que su resistencia interna es más elevada que en las otras configuraciones. La potencia obtenida es la menor, lo que confirma el impacto negativo de la menor porosidad y conductividad de este material en el transporte iónico y, por tanto, en la eficiencia de la celda.

En todos los casos, las curvas de potencia presentan un comportamiento análogo. Para resistencias bajas, la corriente es alta pero la tensión cae rápidamente, resultando en una potencia moderada. La potencia se incrementa con el aumento de la resistencia hasta alcanzar un máximo, que corresponde a proximidad entre la resistencia interna y la resistencia externa del sistema. Tras superar el valor óptimo, la potencia desciende progresivamente a medida que la tensión se acerca a la OCV y la corriente útil disminuye.

El gráfico ampliado muestra con mayor detalle la región del máximo de potencia, permitiendo visualizar con precisión el valor óptimo de resistencia externa para operación eficiente. Estos valores se han determinado en $1,25 \text{ k}\Omega$ para la MFC-1,

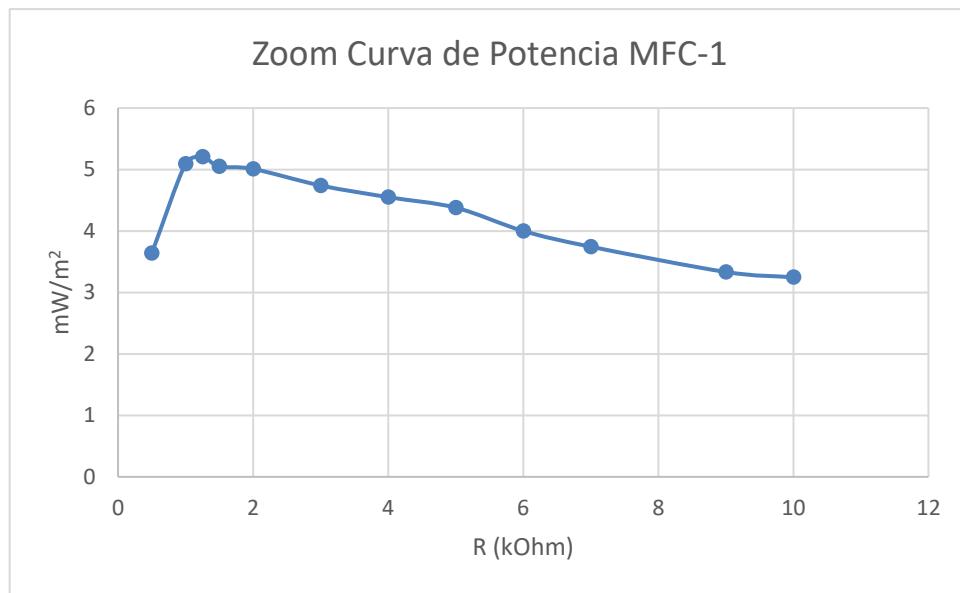


Figura 24 Detalle Curva Potencia MFC-1C-3

7.2 DETERMINACIÓN DE LA DQO

Toma de muestras finales del agua residual de cada configuración tras los tiempos establecidos (24 y 48 horas).

Disminución de la DQO en porcentaje

HRT	DQO MFC 1	DQO WMFC 2	DQO WMFC 3
24 H	35.29%	20.78%	16.27%
48 H	44.71%	42.16%	19.02%

Tabla 3 Reducción de DQO (%)

Digestión térmica de muestras en digestor Spectroquant® siguiendo metodología recomendada por el fabricante. (Anexo). Medición fotométrica de la DQO final utilizando espectrofotómetro Spectroquant® Prove 100. (Anexo).

La tabla muestra las celdas microbianas estudiadas: una celda de combustible microbiana de doble cámara con puente salino (MFC-1) y dos celdas tipo WMFC, fabricadas con madera de pino (WMFC-2) y tablero OSB-3 (WMFC-3). Dichas muestras se tomaron tras periodos de retención hidráulica (HRT) de 24 y 48 horas.

En el periodo de retención hidráulica más corto, correspondiente a 24 horas, se observa que la mayor reducción porcentual de la DQO se consigue con la configuración MFC-1, alcanzando un valor de 35,29 %. Este resultado muestra que el diseño con doble cámara y puente salino es más eficiente en la reducción de contaminantes orgánicos en un tiempo reducido, posiblemente debido a la separación

efectiva entre las cámaras y un ambiente controlado que optimiza el metabolismo microbiano electrogénico. Las WMFC presentan una eficiencia significativamente menor en este mismo periodo, con valores de reducción del 20,78 % para la WMFC-2 (madera de pino) y 16,27 % para la WMFC-3 (OSB-3). Esta diferencia podría estar asociada a la limitada difusión protónica y la menor capacidad catalítica inherente a la estructura de madera utilizada como separador físico.

En cuanto al periodo de retención hidráulica prolongado hasta las 48 horas, las configuraciones muestran una tendencia general hacia un incremento en la eficiencia de reducción de DQO, particularmente notable en la WMFC-2, cuya disminución en la DQO alcanza un 42,16 %, un incremento significativo respecto al valor obtenido a las 24 horas. Este aumento revela que, en un periodo más prolongado, la WMFC con madera de pino incrementa considerablemente su eficacia, alcanzando valores próximos a la MFC de doble cámara con puente salino, que a 48 horas logra un 44,71 % de reducción. Este resultado implica que, aunque la WMFC-2 presenta limitaciones iniciales, puede alcanzar un rendimiento considerablemente competitivo en tratamientos más prolongados, indicando una difusión protónica efectiva a largo plazo y una buena adaptación del biofilm a la estructura de madera. En contraste, la WMFC-3 muestra un rendimiento limitado incluso a las 48 horas, obteniendo tan solo un 19,02 % de reducción en la DQO, lo que confirma las limitaciones de permeabilidad y conductividad asociadas al tablero OSB-3 además de su mayor espesor en comparación con la WMFC de pino.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se desarrollaron ensayos experimentales sobre diferentes configuraciones de celdas de combustible microbianas (MFC), concretamente una MFC de doble cámara con puente salino y dos celdas tipo Wood Microbial Fuel Cell (WMFC) fabricadas con madera de pino y tablero OSB 3. Los ensayos se llevaron a cabo durante 14 días bajo condiciones controladas, manteniendo un rango térmico de 22 – 28 °C y un intervalo de pH entre 6,5 y 7,5. Previamente a los ensayos, se destinó una semana para permitir la formación y estabilización de la biopelícula sobre los electrodos.

Por otra parte, las WMFC de madera, tanto de pino como de OSB 3, mostraron tensiones en circuito abierto menores respecto a la MFC de doble cámara. Dentro de las WMFC, la madera de pino alcanzó tensiones más elevadas que el OSB 3, atribuido a su menor espesor y mayor porosidad. Pese a su menor rendimiento eléctrico inmediato, la WMFC con OSB 3 presentó una durabilidad notablemente superior y un coste significativamente menor (aproximadamente 7 euros/m² frente a los 18 euros/m² del pino), constituyendo así una opción relevante desde la perspectiva de sostenibilidad y viabilidad económica.

Se identificó un aspecto crucial en el análisis comparativo, evidenciando que, aunque el material de madera de pino presenta una resistencia iónica intrínseca menor comparada con el puente salino, la resistencia interna efectiva total de las WMFC resultó ser mayor debido a factores estructurales y operacionales, como la menor superficie efectiva de contacto electrodo-electrolito, mayores impedancias de difusión iónica y menor densidad de corriente generada.

Se detectaron diversas fuentes potenciales de error durante los ensayos, tales como corrosión y degradación en conexiones eléctricas, deterioro de las cajas de madera, evaporación significativa en las celdas de madera que no se pudieron mantener lo suficientemente humectadas y variabilidad en la densidad y uniformidad del biofilm formado. Inicialmente se probó con contrachapado fenólico, pero su mal comportamiento ante condiciones húmedas mostró su inviabilidad como material, optándose finalmente por OSB 3.

En cuanto a la eficiencia en la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se observó que la configuración de doble cámara con puente salino presentó ventajas claras en tratamientos de corta duración, manteniendo un rendimiento constante en períodos prolongados. Sin embargo, la WMFC de madera de pino mostró ser una alternativa viable para tratamientos a medio-largo plazo, logrando eficiencias de depuración considerablemente competitivas y destacando claramente en términos de sostenibilidad ambiental y costes operativos. La WMFC de OSB 3, pese a sus ventajas económicas y durabilidad, presentó limitaciones técnicas significativas en la reducción de contaminantes orgánicos, sugiriendo la necesidad de continuar la investigación para mejorar su eficiencia global.

Cabe destacar que los ensayos se realizaron una sola vez por cada configuración, por lo que los resultados obtenidos tienen carácter exploratorio; futuras investigaciones deberían considerar ensayos repetidos para validar la reproducibilidad de los datos.

Para dar continuidad a esta investigación y abordar las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de investigación y desarrollo futuro:

Optimización estructural y material de las WMFC: Investigar diferentes espesores y tratamientos superficiales de la madera para minimizar la pérdida de humedad, así como evaluar la impregnación con soluciones salinas para mejorar la conductividad protónica. Explorar diferentes especies de madera o materiales alternativos altamente porosos y de bajo coste, incluyendo maderas tropicales o materiales reciclados, con el objetivo de mejorar la transferencia iónica sin aumentar significativamente los costes.

Mitigación efectiva de la pérdida de humedad: Desarrollar e implementar sistemas avanzados de control y mantenimiento de humedad interna en las WMFC, tales como revestimientos parciales impermeables, sistemas de recirculación lenta de líquidos o sistemas automatizados de humidificación.

Escalado del sistema y configuración en serie o paralelo: Diseñar y construir múltiples unidades de celdas microbianas conectadas en configuraciones en serie o paralelo para evaluar incrementos potenciales en la potencia generada y en la eficiencia de reducción de

DQO en regímenes continuos, acercando el proyecto a escenarios reales de aplicación práctica.

Estudio de estabilidad y monitoreo a largo plazo: Realizar ensayos extendidos en períodos significativamente mayores (semanas o meses) para evaluar la estabilidad operativa, identificar mecanismos de degradación o corrosión y proponer soluciones tecnológicas como revestimientos protectores anticorrosivos para electrodos y conexiones.

Caracterización microbiológica: Identificar y cultivar cepas bacterianas específicas que incrementen la eficiencia electrogénica del sistema, tales como Geobacter sp., mediante técnicas de inoculación controlada y monitoreo microbiológico especializado, enriqueciendo la eficiencia global y ofreciendo nuevas perspectivas para mejorar el rendimiento del sistema.

.

9. **BIBLIOGRAFÍA**

- Bhaduri, S., & Behera, M. (2024). From single-chamber to multi-anodic microbial fuel cells: A review. *Journal of Environmental Management*, 355, 120465. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120465>
- Boas, J. V., Oliveira, V. B., Simões, M., & Pinto, A. M. F. R. (2022). Review on microbial fuel cells applications, developments and costs. *Journal of Environmental Management*, 307, 114525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114525>
- Borjas, Z., Esteve-Núñez, A., & Ortiz, J. M. (2017). Strategies for merging microbial fuel cell technologies in water desalination processes: Start-up protocol and desalination efficiency assessment. *Journal of Power Sources*, 356, 519-528. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.052>
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464-482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>
- European Investment Bank. & Environment and Natural Resources Department. (2022). *Wastewater as a resource: May 2022*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2867/31206>
- Franks, A. E., Malvankar, N., & Nevin, K. P. (2010). Bacterial biofilms: The powerhouse of a microbial fuel cell. *Biofuels*, 1(4), 589-604. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.25>
- Gude, V. G. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview. *Journal of Cleaner Production*, 122, 287-307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.022>

- Huang, X., Duan, C., Duan, W., Sun, F., Cui, H., Zhang, S., & Chen, X. (2021). Role of electrode materials on performance and microbial characteristics in the constructed wetland coupled microbial fuel cell (CW-MFC): A review. *Journal of Cleaner Production*, 301, 126951. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126951>
- Ieropoulos, I., Greenman, J., Melhuish, C., & Horsfield, I. (s. f.). *EcoBot-III: a robot with guts.*
- Jones, E. R., Van Vliet, M. T. H., Qadir, M., & Bierkens, M. F. P. (2021). Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13(2), 237-254. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>
- Kadier, A., Simayi, Y., Abdeshahian, P., Azman, N. F., Chandrasekhar, K., & Kalil, M. S. (2016). A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 427-443. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.008>
- Khaled, F., Ondel, O., & Allard, B. (2016). Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor. *Journal of Power Sources*, 306, 354-360. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.040>
- Khan, M. R., Bhattacharjee, R., & Amin, M. S. A. (2012). Performance of the Salt Bridge Based Microbial Fuel Cell. *International Journal of Engineering & Technology*, 1(2), 115. <https://doi.org/10.14419/ijet.v1i2.78>
- Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Liang, X., Ayub, M., Goh, H. H., Kusworo, T. D., Mohyuddin, A., & Chew, K. W. (2022). Microbial Fuel Cells (MFC): A Potential Game-Changer in Renewable Energy Development. *Sustainability*, 14(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su142416847>

- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192.
<https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Martín, M., Hernández-Crespo, C., Andrés-Doménech, I., & Benedito-Durá, V. (2020). Fifty years of eutrophication in the Albufera lake (Valencia, Spain): Causes, evolution and remediation strategies. *Ecological Engineering*, 155, 105932.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105932>
- Nitisoravut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81-89.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Oh, S. T., Kim, J. R., Premier, G. C., Lee, T. H., Kim, C., & Sloan, W. T. (2010). Sustainable wastewater treatment: How might microbial fuel cells contribute. *Biotechnology Advances*, 28(6), 871-881. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.07.008>
- Palanisamy, G., Jung, H.-Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., & Roh, S.-H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*, 221, 598-621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172>
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533-1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>

- Pasternak, G., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2017). Self-powered, autonomous Biological Oxygen Demand biosensor for online water quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 244, 815-822. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.019>
- Pisciotta, J. M., & Dolceamore Jr, J. J. (2016). Bioelectrochemical and Conventional Bioremediation of Environmental Pollutants. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 8(4). <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000306>
- Puig, S., Ganigué, R., Batlle-Vilanova, P., Balaguer, M. D., Bañeras, L., & Colprim, J. (2017). Tracking bio-hydrogen-mediated production of commodity chemicals from carbon dioxide and renewable electricity. *Bioresource Technology*, 228, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.035>
- Redondo Iriarte, J. J. (2018). *Microorganismos electrogénicos: Células de combustible microbianas*. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/37227>
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 7-8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Saba, B., Christy, A. D., Yu, Z., & Co, A. C. (2017). Sustainable power generation from bacterio-algal microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.115>
- Santoro, C., Serov, A., Gokhale, R., Rojas-Carbonell, S., Stariha, L., Gordon, J., Artyushkova, K., & Atanassov, P. (2017). A family of Fe-N-C oxygen reduction electrocatalysts for microbial fuel cell (MFC) application: Relationships between

- surface chemistry and performances. *Applied Catalysis B: Environmental*, 205, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.12.013>
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Srinivasan, S., Jeevanantham, S., Kamalesh, R., & Karishma, S. (2022). Sustainable strategy on microbial fuel cell to treat the wastewater for the production of green energy. *Chemosphere*, 290, 133295. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133295>
- Singh, K., & Dharmendra, D. (2020). Optimization and performance evaluation of microbial fuel cell by varying agar concentration using different salts in salt bridge medium. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2(101), 79-84. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1193>
- Tahir, C. A., Agarwal, C., Pásztory, Z., & Csóka, L. (2024). A novel membrane-less microbial fuel cell reactor using wood as container and separator to prevent air-cathode deterioration and biofouling. *Discover Water*, 4(1), 29. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00085-x>
- Urbanski, B., & Nogueira, M. (2024). Excessive Eutrophication as a Chemical Barrier for Fish Fauna Dispersion: A Case Study in the Emblematic Tietê River (São Paulo, Brazil). *Water*, 16(10), 1383. <https://doi.org/10.3390/w16101383>
- Walter, X. A., Greenman, J., & Ieropoulos, I. A. (2020). Microbial fuel cells directly powering a microcomputer. *Journal of Power Sources*, 446, 227328. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227328>
- Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., & Guerrero-Barajas, C. (2021). Modern trend of anodes in microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101579. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101579>

Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., & Rodríguez-Couto, S. (2020). Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Biochemical Engineering Journal*, 164, 107779.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107779>

Yuan, H., & He, Z. (2015). Graphene-modified electrodes for enhancing the performance of microbial fuel cells. *Nanoscale*, 7(16), 7022-7029.
<https://doi.org/10.1039/c4nr05637j>

ANEXO I

Preparación del puente salino

Ingredientes

Ingrediente	Cantidad
NaCl	4,3g
Agar-Agar	2.5g
Agua destilada	25 ml

Procedimiento

1. Calentar los 25 ml de agua destilada en un recipiente adecuado.
2. Añadir el NaCl y remover hasta disolución completa.
3. Añadir poco a poco el agar-agar mientras se remueve continuamente.
4. Llevar a ebullición suave durante 1–2 minutos hasta obtener una mezcla homogénea.
5. Tapamos uno de los extremos para llenar el tubo hasta su totalidad
6. Rellenar el tubo de silicona con la mezcla aún líquida usando una jeringa o embudo.
7. Dejar enfriar durante 30–60 minutos hasta que gelifique por completo.

En el puente salino es donde el intercambio de protones se realiza por lo que debe estar en contacto con el medio líquido tanto en la cámara anódica como en la catódica. La elección del tubo corrugado se ha realizado, por su elasticidad para evitar perforar el cristal simplemente se dobla cuidadosamente el tubo en forma de U antes de llenarlo para que esté en contacto en las dos cámaras con el medio.



Figura 25 Puente salino utilizado en el ensayo

Equipamiento utilizado en el laboratorio

Para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se ha utilizado el método fotométrico con kits comerciales Spectroquant®, conforme a la normativa ISO 15705. A continuación, se describen los equipos empleados en las mediciones, los cuales han sido fundamentales para garantizar la precisión y reproducibilidad de los datos obtenidos durante los ensayos.

Espectrofotómetro

Se utilizó el modelo **Spectroquant® Prove 100** para la lectura fotométrica de las cubetas tras la digestión térmica. Este equipo permite lecturas precisas a 445 nm, que es la longitud de onda requerida por el método.



Figura 26 Espectrofotómetro utilizado

Se ha calibrado previamente y dispone de protocolos preprogramados para análisis de DQO, facilitando así la operación segura y eficiente en el entorno de laboratorio.

Cubetas de reacción

Se emplearon cubetas reactivas prellenadas con reactivo oxidante y ácido sulfúrico concentrado, diseñadas específicamente para el método Spectroquant®. Cada cubeta permite una determinación individual. El volumen de muestra añadido fue de **3,0 ml**, y se sellaron herméticamente antes de la digestión.

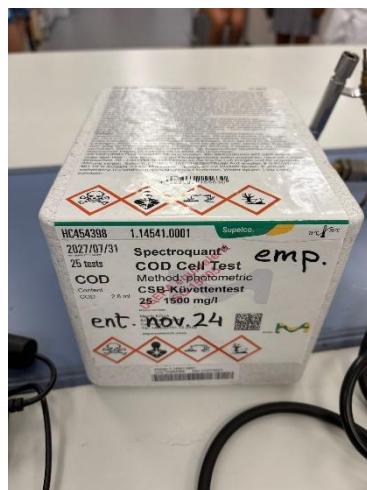


Figura 27 Cubetas usadas en los ensayos

Digestor térmico

La digestión térmica de las muestras se llevó a cabo en un **digestor térmico**

Spectroquant®, programado a **148 °C durante 2 horas**, según el protocolo del fabricante. El digestor asegura una temperatura constante y homogénea, condición crítica para la oxidación completa de la materia orgánica presente en las muestras.



Figura 28 Digestor utilizado en los ensayos

Consideraciones operativas

- Las muestras fueron homogeneizadas previamente a su análisis.
- Se trabajó con medidas de seguridad adecuadas al tratar reactivos corrosivos (uso de guantes, gafas y campana extractora).
- Una vez finalizada la digestión y enfriadas las cubetas, se procedió a su lectura.

Resistencia variable

Se empleó una resistencia variable tipo caja de décadas, provista de seis selectores rotativos que cubren rangos desde 10Ω hasta $1 M\Omega$, especialmente indicada para la caracterización eléctrica de los prototipos. Cada década permite fijar con precisión la carga externa deseada sin necesidad de alterar el circuito, garantizando así la repetibilidad de las mediciones. La conexión al sistema se realizó mediante bornes de seguridad con clavijas banana, lo que facilitó cambios rápidos de resistencia durante los ensayos de polarización.



Figura 30 Caja de décadas

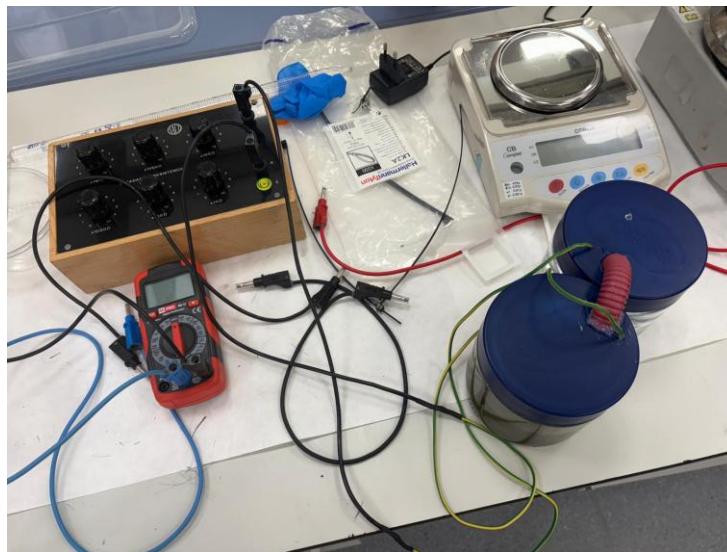


Figura 29 Ejemplo de ensayo de MFC de doble cámara



Figura 31 MWFC de OSB-3

MFC 1	R (kohm)	V(mv)	V square	R	P	mW/m^2
	0.5	49	0.002401	500	0.000004802	3.637879
	1	82	0.006724	1000	0.000006724	5.093939
	1.25	92.7	0.008593	1250	6.87463E-06	5.208055
	1.5	100	0.01	1500	6.66667E-06	5.050505
	2	115	0.013225	2000	6.6125E-06	5.00947
	3	137	0.018769	3000	6.25633E-06	4.739646
	4	155	0.024025	4000	6.00625E-06	4.550189
	5	170	0.0289	5000	0.00000578	4.378788
	6	178	0.031684	6000	5.28067E-06	4.000505
	7	186	0.034596	7000	4.94229E-06	3.744156
	9	199	0.039601	9000	4.40011E-06	3.333418
	10	207	0.042849	10000	4.2849E-06	3.246136
	20	236	0.055696	20000	2.7848E-06	2.109697
	30	259	0.067081	30000	2.23603E-06	1.693965
	50	283	0.080089	50000	1.60178E-06	1.21347
	100	308	0.094864	100000	9.4864E-07	0.718667

Tabla 4 Detalle eléctrico MFC-I

WMFC-2						
R (kohm)	V(mv)	V square	R	P	mW/m^2	
0.5	49	0.002401	500	0.000002312	0.5	
1	82	0.006724	1000	0.000002116	0.529	
1.25	92.7	0.008593	1250	0.000002	0.53	
1.5	100	0.01	1500	2.24267E-06	0.560667	
2	115	0.013225	2000	0.00000245	0.6125	
3	137	0.018769	3000	0.000002352	0.588	
4	155	0.024025	4000	2.16225E-06	0.540563	
5	170	0.0289	5000	0.000002	0.5	
6	178	0.031684	6000	0.000001944	0.486	
7	186	0.034596	7000	1.88929E-06	0.472321	
9	199	0.039601	9000	1.79211E-06	0.448028	
10	207	0.042849	10000	1.7161E-06	0.429025	
20	236	0.055696	20000	1.0952E-06	0.2738	
30	259	0.067081	30000	7.803E-07	0.195075	

Tabla 5 Detalle eléctrico WMFC-2

WMFC-3	R (kohm)	V(mv)	V square	R	P	mW/m^2
	0.5	10	0.0001	500	0.000002312	0.05
	1	20	0.0004	1000	0.000002116	0.125
	1.25	30	0.0009	1250	0.000002	0.225
	1.5	40	0.0016	1500	2.24267E-06	0.32
	2	49	0.002401	2000	0.00000245	0.400167
	3	59	0.003481	3000	0.000002352	0.435125
	4	74	0.005476	4000	2.16225E-06	0.456333
	5	83	0.006889	5000	0.000002	0.430563
	6	90	0.0081	6000	0.000001944	0.405
	7	95	0.009025	7000	1.88929E-06	0.376042
	9	99	0.009801	9000	1.79211E-06	0.350036
	10	104	0.010816	10000	1.7161E-06	0.300444
	20	108	0.011664	20000	1.0952E-06	0.22
	30	111	0.012321	30000	7.803E-07	0.154013

Tabla 7 Detalle eléctrico WMFC-3

HRT	DQO inic	DQO FINAL	
24	510	341	33.14%
48	510	279	45.29%
24	510	404	20.78%
48	510	294	42.35%
24	510	427	16.27%
48	510	411	19.41%

Tabla 6 Detalle disminución de DQO (mg/L)