

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias Farmacéuticas,
Bioquímicas y Biotecnológicas

Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica



**“GENERACIÓN Y ACUMULACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
UTILIZANDO SISTEMAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE
MICROBIANAS (MFC) INOCULADAS CON LODOS ACTIVOS
PROCEDENTES DE LA PTAP “LA TOMILLA”-AREQUIPA”**

Tesis presentada por la Bachiller:

Heillen Melisa Calderón Castillo

Para Optar el Título profesional de:

Ingeniera Biotecnóloga

Asesor: Mg. Javier Roque Rodríguez

Arequipa-Perú

2017

Agradecimientos

Quiero agradecer ante todo a mis padres, Nicolás y Eleana, por acompañarme a lo largo de este camino; a mi hermano Jesús, a Ximena, Lizbeth y JeanPaul, grandes personas que me sirvieron de apoyo y referencia en toda mi etapa universitaria. Y por último agradecer a mi pequeño Athos, por ser estar siempre a mi lado.



Índice de Contenidos

Agradecimientos	II
Índice de Contenidos.....	III
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	IX
Glosario.....	X
Resumen.....	XI
Abstract	XIII
Introducción	1
Objetivos	3
Objetivo Principal	3
Objetivos Secundarios.....	3
Hipótesis.....	4
Capítulo I.....	5
1. Marco Teórico.....	5
1.1. Revisión necesidades energéticas: Perú	5
1.2. Celdas de Combustible Microbianas.....	6
1.3. Membranas en la producción energética.....	8
1.4. Electroodos.....	10
1.4.1. Ánodo	12
1.4.2. Cátodo	13
1.5. Microorganismos electrogénicos.....	14
1.6. Mecanismos de transferencia de electrones	14
1.7. Inóculos de cultivos bacterianos puros.....	19

1.8.	Inóculos de consorcios bacterianos	20
1.9.	Lodos activos de plantas de tratamiento de agua potable como fuente microbiana electrogénica	21
1.10.	Sustratos en celdas de combustible microbianas.....	21
1.11.	Agua residual sintética en MFC	22
1.12.	Diseño de MFC	23
1.13.	Diseño celdas de combustible en ausencia de membrana de intercambio protónico. (ML- MFC).....	29
1.14.	Electricidad, Corriente eléctrica.....	32
1.15.	Circuitos en serie.....	32
	Capítulo II	34
2.	Materiales y Métodos.....	34
2.1.	Lugar de ejecución y recolección de muestras.....	34
2.2.	Materiales.....	34
2.2.1.	Vidrio	34
2.2.2.	Unidades Biológicas.....	34
2.2.3.	Reactivos Químicos y Bioquímicos	34
2.2.4.	Instrumentación y Equipos.....	35
2.2.5.	Otros	35
2.3.	Recolección y tratamiento del material biológico.....	36
2.4.	Tratamiento membrana de intercambio protónico	37
2.5.	Diseño Y Construcción ML-MFC.....	37
2.6.	Construcción MFC	38
2.7.	Pre-operación MFC y ML-MFC	38
2.8.	Comparación performance bioelectrogénica entre las celdas ML-MFC y MFC41	
2.9.	Conexión en serie: Aplicación energética.....	41

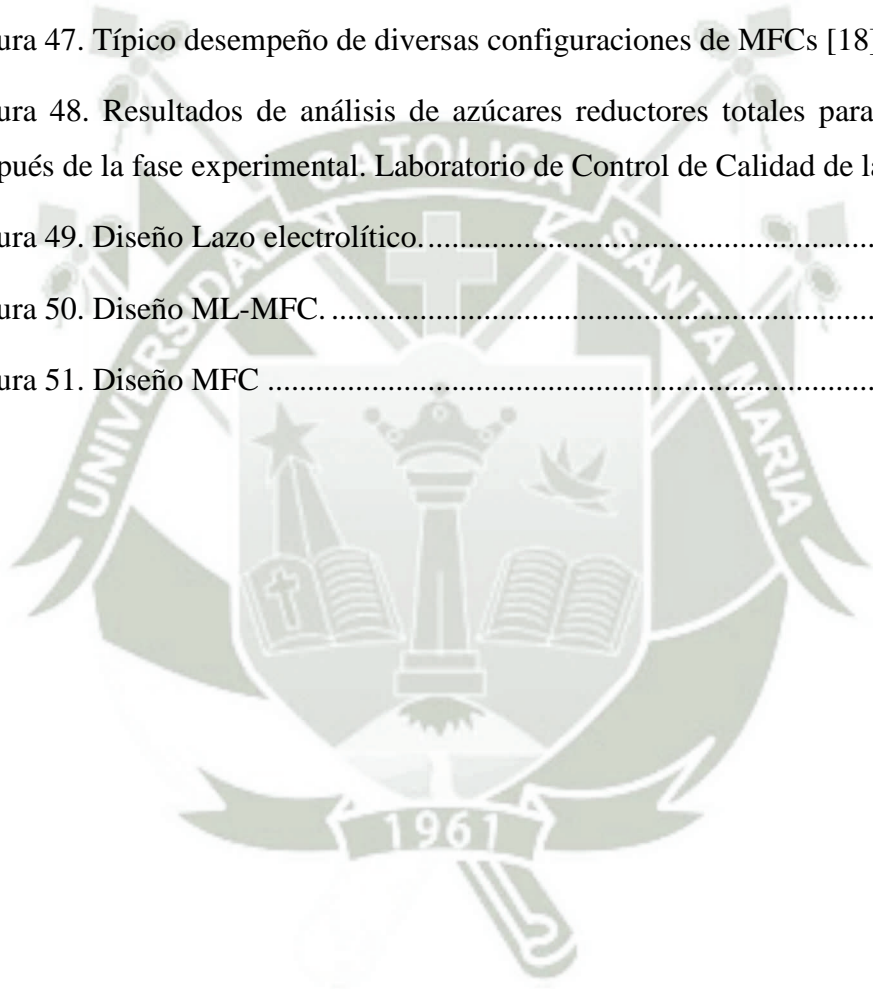
2.10.	Determinación de potencia.....	43
2.11.	Determinación de densidad de potencia.....	43
2.12.	Determinación energía total producida	43
2.13.	Análisis estadístico.....	44
Capítulo III.....		45
3.	Resultados	45
3.1.	Recolección material biológico.....	45
3.2.	Tratamiento membrana de intercambio protónico	45
3.3.	Diseño y construcción ML-MFC	46
3.4.	Construcción MFC	50
3.5.	Pre-operación MFC y ML-MFC	51
3.6.	Comparación performance bioelectrogénica entre las celdas ML-MFC y MFC.....	65
3.7.	Conexión en serie: Aplicación energética.....	66
3.8.	Determinación de potencia.....	69
3.9.	Determinación densidad de potencia (DP).....	69
3.10.	Determinación de energía total producida	71
Capítulo IV.....		74
4.	Conclusiones	74
5.	Recomendaciones.....	75
Referencias Bibliográficas		76
Anexos		85

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema componentes básicos de una MFC.....	7
Figura 2. Materiales de carbón tradicionalmente usados como electrodos en MFCs.11	
Figura 3. Representación esquemática del biofilm de <i>G. sulfurreducens</i> en el ánodo, mostrando la representación de varios citocromos a través del biofilm.	16
Figura 4. Mecanismos de Transferencia de electrones. [18].....	18
Figura 5. Diagrama de flujo de una planta convencional de tratamiento de agua potable.....	22
Figura 6. Reactor en forma de cubo con cátodo aire.....	24
Figura 7. Reactor uni-cámara, cátodo aire con brazo lateral.....	24
Figura 8. Reactor tipo SMMFC	25
Figura 9. Diversas configuraciones de MFC de dos cámaras.	25
Figura 10. Bushing MFC presentado por You en 2006	26
Figura 11. Reactores tubulares de lecho empacado	27
Figura 12. Fotografía y esquema de MFC apiladas	28
Figura 13. Diseños de MFC para la producción de Bio-hidrógeno	29
Figura 14. Celdas de combustible microbianas en ausencia de PEM.....	31
Figura 16. Diagrama conexiones seriadas en ML-MFC y MFC, para el almacenamiento de energía.	42
Figura 17. Diagrama ventilador portátil conectado a la batería, para la utilización de la energía.	42
Figura 18. Tratamiento de Activación de membrana Nafion 117.....	46
Figura 19. Diseño lazo electrolítico diseñado	47
Figura 20. Lazo electrolítico diseñado para ML-MFC.	47
Figura 21. Configuración general ML-MFC.....	48

Figura 22. Sistemas tipo ML-MFC totalmente ensamblado y en funcionamiento	49
Figura 23. Sistema de aireación ideado para MFC y ML-MFC.	49
Figura 24. Configuración general MFC	50
Figura 25. Sistemas tipo MFC totalmente ensamblado y en funcionamiento.....	51
Figura 26. Resultados del análisis de Oxígeno disuelto, al inicio y al final de la experimentación	52
Figura 27. Intervalos de cc inicial DO (ppm) para ML-MFC vs MFC y cc final (ppm) para ML-MFC vs MFC	54
Figura 28. Valores individuales de cc inicial DO (ppm) para ML-MFC vs MFC y cc final DO (ppm) para ML-MFC vs MFC	54
Figura 29. Resultados conductividad en uS/cm.	55
Figura 30. Intervalos de cc inicial de Conductividad (uS/cm) vs cc final Conductividad (uS/cm) para ML-MFC y MFC.	57
Figura 31. Valores individuales cc inicial de conductividad (uS/cm) vs final conductividad (uS/cm) para ML-MFC y MFC.	57
Figura 32. Gráfico de barras resultados análisis Total de sólidos disueltos en ppm.	58
Figura 34. Valores individuales cc (inicial) TDS de ML-MFC vs MFC, y cc (final) TDS de ML-MFC vs MFC.....	60
Figura 35. Resultado análisis % disminución de CDO	61
Figura 36. Intervalos de COD inicial de MFC y ML-MFC vs COD final de MFC y ML-MFC	63
Figura 37. Intervalos de % disminución de COD de ML-MFC vs MFC.....	63
Figura 38. Sistemas MFC y ML-MFC en funcionamiento y monitorización.....	65
Figura 39. Resultados diferencia de potencial	67
Figura 40. Evolución recolección energética en las baterías de almacenamiento.	68
Figura 41. Mini-ventilador portátil en funcionamiento con la energía producida y almacenada.....	68

Figura 42. Intervalos de Máxima Densidad de Potencia (mW/m ²) de ML-MFC vs MFC	70
Figura 43. Gráfico de barras Producción energética en Joules	71
Figura 44. Gráfica para valores de producción energética total en Joules para ML-MFC vs MFC	73
Figura 45. Materiales utilizados como ánodos en MFCs [16]	85
Figura 46. Microorganismos y sustratos utilizados en MFCs [29]	86
Figura 47. Típico desempeño de diversas configuraciones de MFCs [18]	87
Figura 48. Resultados de análisis de azúcares reductores totales para las muestras después de la fase experimental. Laboratorio de Control de Calidad de la UCSM...	98
Figura 49. Diseño Lazo electrolítico.....	99
Figura 50. Diseño ML-MFC.....	100
Figura 51. Diseño MFC	101



Índice de Tablas

Tabla 1. Composición Agua Residual Sintética	39
Tabla2. Parámetros fisicoquímicos evaluados con el Multiparámetro Hanna H9829.....	40
Tabla 3. Resultados caracterización inicial lodos activos.....	45
Tabla 4. Método T-student para OD de ML-MFC y MFC	53
Tabla 5. T-student para dos muestras OD	53
Tabla 6. Método T-student para Conductividad (uS/cm).....	56
Tabla 7. T-student para dos muestras Conductividad	56
Tabla 8. Método T-student para TDS (ppm).....	59
Tabla 9. T-student para las medias TDS	59
Tabla 10. Método T-student para % de disminución de CDO.....	62
Tabla 11. T-student para las medias % disminución de CDO	62
Tabla 12. Resultados del análisis de azúcares reductores totales.....	64
Tabla 13. Máximo voltaje registrado obtenido por sistema.....	66
Tabla 14. Máxima densidad de Potencia obtenida en los sistemas.....	69
Tabla 15 .Método T-student para máxima densidad de potencia.....	70
Tabla 16. T-student para medias de Máxima Densidad de Potencia	70
Tabla 17. Producción energética total por sistemas, expresado en Joules	72
Tabla 18. T-student para Producción energética total en Joules.....	72
Tabla 19. T-student para producción energética total	72

Glosario

A: amperaje, intensidad de corriente.

CE: corriente

COD: Demanda química de oxígeno, por sus siglas en inglés

DE: Desviación estándar

DP: Densidad de potencia

DO: Oxígeno disuelto, por sus siglas en inglés

FC: Celdas de combustible, por sus siglas en inglés

I: Intensidad de corriente, amperaje

MFC: Celdas de Combustible Microbiana, por sus siglas en inglés

ML-MFC: Celdas de combustible microbiana sin membrana, por sus siglas en inglés

P: Potencia

PEM: Membrana de intercambio protónico, por sus siglas en inglés

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable

SCMFC: Single Chamber Microbiological Fuel Cell

RAFA: Reactor anaeróbico de flujo ascendente

TDS: Total de sólidos disueltos, por sus siglas en inglés

V: Diferencia de potencial, voltaje



Resumen

Las celdas de combustible microbianas son una tecnología emergente, que va cobrando importancia en el campo de las energías renovables, así como en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, esta novedosa tecnología presenta diversos desafíos. En la presente investigación se diseñó y construyó una celda de combustible microbiana en ausencia de membrana de intercambio protónico, y se comparó con un sistema control, es decir con una celda de combustible microbiano con membrana Nafion 117 de esta manera se intentó demostrar que se puede excluir a las costosas membranas en la construcción de las MFC reduciendo costos de manera exponencial. Los sistemas fueron inoculados con lodos activos de la PTAP “La tomilla”.

El sistema construido en ausencia de membrana, tomó como principio el flujo unidireccional a través de un lazo electrolítico. Ambos sistemas se mantuvieron funcionando por 25 días de manera continua, produciendo una media de producción energética de 631.33 Joules (DE=15.5), y una media de máxima densidad de potencia de 200.22 mW/m² (DE=4.93), para los sistemas sin membrana. Mientras que los sistemas control produjeron una media de producción energética de 622.3 Joules (DE=17.7) y una media de máxima densidad de potencia de 197.7mW/m²

(DE=5.60). El análisis estadístico realizado demostró que no existía diferencia significativa entre los resultados de los sistemas con y los sin membrana, por lo tanto, se demostró que las membranas de intercambio protónico pueden ser removidas de los diseños de dichos sistemas sin tener repercusiones negativas en la producción energética.

Palabras clave: *celdas de combustible microbianas, membrana de intercambio protónico, lazo electrolítico.*



Abstract

Microbial fuel cells are an emerging technology, which is gaining importance in the field of renewable energy, as well as in the treatment of wastewater. However, this new technology presents several challenges. In the present investigation, a microbial fuel cell was designed and constructed in the absence of a proton exchange membrane, and compared to a control system, with a Nafion 117 membrane microbial fuel cell, in this way it was tried to demonstrate that the expensive membranes can be excluded in the construction of the MFC reducing costs exponentially. The systems were inoculated with activated sludge from PTAP "La tomilla".

The system built in the absence of membrane, took as a principle the unidirectional flow through an electrolytic loop. Both systems continued to operate for 25 days continuously, producing an average energy output of 631.33 Joules (DE=15.5), and an average maximum power density of 200.22 mW/m² (DE=4.93), for systems without a membrane. While membrane systems produced an average energy output of 622.3 Joules (DE=17.7), and an average maximum power density of 197.7 mW/m² (DE=5.60). The statistical analysis showed that there was no significant difference between the results of the systems with and without membranes, therefore it was demonstrated that the proton exchange membranes can be removed from the designs of these systems without having negative repercussions on the energy production.

Key words: microbial fuel cells, proton exchange membrane, electrolytic loop

Introducción

El siguiente trabajo de investigación se realizó como parte del proyecto PIAP-2-P-810-14, de título: “Evaluación e implementación de un sistema de generación de energía electroquímica, debido a la actividad microbiana mixta, de efluentes residuales vacuno, cunícola, avícola y porcina. Donde se plantea la generación eléctrica en celdas de combustible microbiana con membrana de intercambio protónico, para su captura y almacenamiento en baterías”.

Las celdas de combustible microbiana, están consideradas dentro del campo de la bioelectricidad, y es considerada una tecnología altamente atractiva, debido a que son dispositivos que pueden utilizar el metabolismo bacteriano para producir una corriente eléctrica procedente de una amplia gama de sustratos orgánicos, sin producir la emisión significativa de gases contaminantes, agregando que paralelamente a la producción de energía, se realiza la limpieza de los efluentes de desechos utilizados [1]. Para mejorar aún más la tecnología MFC se requiere una comprensión de las limitaciones y microbiología de estos sistemas, así como mayor estudio de los materiales usados. Algunos investigadores están descubriendo que el mayor valor de la tecnología MFC tal vez no sea la producción de electricidad, pero sí la capacidad de los microbios de electrodo asociada para degradar los residuos y productos químicos tóxicos [2].

Dentro del mencionado proyecto se abarcó el tema de mejoramiento en el diseño y elementos de las MFC, siendo el tema de mayor interés la membrana de intercambio protónico. Un típico diseño de MFC está compuesto por una cámara anódica y una cámara catódica, las cuales se encuentran conectadas por una membrana intercambio de protónica (PEM), esta permite que los protones se muevan a través del ánodo al cátodo; la principal desventaja de las PEM, es el alto de las mismas [3,4]. El presente trabajo se enfoca en la remoción del elemento PEM, dando lugar a una significativa reducción en los costos. Viridis y sus colegas inventaron el modelo de bucle para eliminar MFC de carbono y nitrógeno en las aguas residuales, en la que algunos H^+ y NH_4^+ podrían transferir desde la cámara de ánodo a la cámara de cátodo a través del bucle de electrolitos [4].

Se plantea un nuevo diseño de MFC, sin membrana de intercambio protónico el cual será comparado con el típico diseño de dos cámaras con membrana de intercambio protónico, se espera una producción energética igual o incluso mayor, con el nuevo diseño; además se propone desarrollar una conexión seriada de sistemas ML-MFC, para una mayor acumulación energética y posterior aplicación de la energía generada.



Objetivos

Objetivo Principal

Generar y acumular energía eléctrica utilizando sistemas de celdas de combustible microbianas (MFC) inoculadas con lodos activos procedentes de la PTAP “La Tomilla”

Objetivos Secundarios

1. Diseñar y construir una celda de combustible microbiana en ausencia de membrana de intercambio protónico (ML-MFC).
2. Comparar la performance bioelectrogénica de celdas de combustible microbianas con y sin membrana de intercambio protónico (MFC y ML-MFC).
3. Determinar la evolución de los parámetros fisicoquímicos (COD, DO, ART, conductividad, TDS), que caracterizan la performance de cada sistema de bioelectrogenación.
4. Analizar estadísticamente los resultados obtenidos a través de un sistema triplicado aplicando análisis de varianza, prueba T pareada y T-student, con el uso del software Minitab versión 17.2.1.

Hipótesis

Es posible generar y acumular energía eléctrica utilizando sistemas de celdas de combustible microbianas (MFC) inoculadas con lodos activos procedentes de plantas potabilizadoras de agua; y generar energía eléctrica en una MFC reemplazando la membrana de intercambio protónico (PEM), con un lazo electrolítico, igualando e incluso superando la producción energética de una MFC que sí cuente con la presencia de una membrana de intercambio protónico.



Capítulo I

1. Marco Teórico

1.1. Revisión necesidades energéticas: Perú

Las necesidades energéticas se encuentran en creciente demanda, del año 2007 al 2015 hubo un crecimiento en la demanda energética del Perú de 7,4% por año. Para el año 2030 se espera que la demanda de electricidad alcance y exceda los 1,632 KWh. Siendo el sector industrial el de mayor demanda con 66% de consumo, seguido por el sector residencial 24%, comercial 19% y por último iluminación pública 3%, divididas entre las fuentes de energía termoeléctrica e hidroeléctrica [5]. Debido a las crecientes necesidades energéticas, el Gobierno Peruano decidió apoyarse en la energía proveniente del gas natural; esta alternativa si bien puede cubrir las demandas energéticas, sería sólo una solución temporal [6].

La energía hidroeléctrica es considerada como el único recurso renovable explotado en nuestro país, el complejo del Mantaro de capacidad de 1,008w, es el más grande del Perú y es operada por ElectroPerú, en 2006 las dos plantas del complejo, tenían la capacidad de generar más de un tercio del suministro total del Perú [7]. La energía eólica y la energía solar, son dos tipos de energía renovable que el Perú está empezando a considerar como alternativas ante la demanda energética. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [8], estima un potencial de energía de origen eólico de 19 GWh/año; siendo las provincias de Laguna Grande, Marcona, Punta Ático y Talara las de mayor potencial; lamentablemente la contribución de este tipo de energía hacia el 2006 alcanzaba sólo los 0,7 MW. La energía solar resulta otra atractiva alternativa de fuente energética, aún sin explotar, en cordillera situada al sur del país, se estima que la energía solar podría alcanzar e incluso superar los 6 kWh/m²/día, resultando de los más altos de mundo [9].

Otro tipo de energías renovables estarían siendo consideradas como microturbinas, que aprovecharían la energía cinética, entre otros. Siendo las celdas de combustible microbianas, las únicas que ofrecen un “plus” a la producción energética, que sería el tratamiento de efluentes de desechos.

1.2. Celdas de Combustible Microbianas

El primer reporte de una celda de combustible microbiana, fue en 1912 con el Profesor M.C. Potter, de la universidad de Durham, quien logró producir electricidad de una bacteria E.coli; sin mucha notoriedad. No fue hasta 1931 que su hallazgo fue revisado por Barnet Cohen, quien desarrolló diversas celdas conectadas, que lograron una diferencia de potencial de 35 voltios. Lewis en 1966 fue el primero en lograr avances prácticos en cuanto al diseño y materiales utilizados; llegando por fin a ser un verdadero campo de interés en 1993 con Allen y Bennet. Sin embargo, todos los experimentos logrados en este lapso de tiempo, requirieron de mediadores químicos. No fue hasta 1999 con Kim, que se descubrió que el uso de mediadores no era imperativo; las investigaciones en MFC siguen en constante progreso, siendo la interacción bacteriana uno de los campos más desafiantes [10,11].

Una celda de combustible microbiana se describe como un sistema el cual genera energía eléctrica a partir de la energía química de un compuesto (generalmente orgánico), mediante la acción bacteriana. Una MFC está conformada por: cámara anódica; cámara catódica; electrodos, medio de intercambio protónico, inóculo bacteriano, aceptor de electrones y sustrato [12]. En el compartimiento anaeróbico (cámara anódica), el combustible es oxidado por los microorganismos, generando electrones y protones; los electrones son transferidos a la cámara catódica a través de un circuito eléctrico externo; mientras que los protones son transferidos a través del medio de intercambio de iones [13]. Bajo las condiciones aeróbicas necesarias, las bacterias utilizarán el oxígeno (o nitrato) como aceptor final de electrones y formará agua; sin embargo, en la cámara anódica no hay oxígeno, por lo que la bacteria se ve obligada a cambiar su aceptor natural de electrones a un aceptor insoluble; tal como un ánodo de MFC [14]. Gracias a la habilidad de la bacteria de transferir electrones hacia un aceptor insoluble de electrones, es que se puede recolectar los electrones del metabolismo microbiano [15,16].

Uno de los principales componentes en las MFC es el separador físico o membrana, para “aislar” la cámara anódica de la catódica, mientras permite el transporte selectivo de protones del ánodo al cátodo. El separador ideal debe ser un buen conductor iónico, aislador electrónico, ion selectivo (conductor de protones), durable, químicamente estable, biocompatible, de difícil obstrucción y de bajo costo [17].

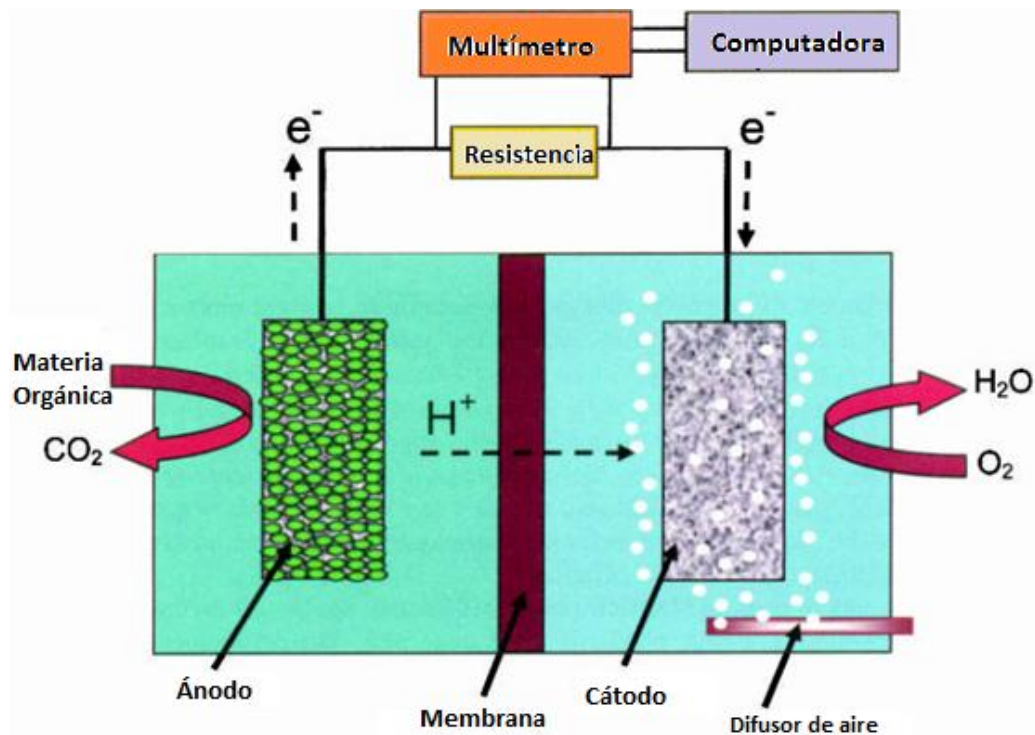


Figura 1. Esquema componentes básicos de una MFC.

El desempeño de una MFC depende de muchos factores tales como: la fuente de combustible, temperatura, inóculo (especie o comunidad microbiana), composición electrodos, material del separador y aceptor de electrones [18]. Se han propuesto una variedad de diseños escalables para la construcción de una MFC. En la mayoría de los estudios, la configuración comúnmente adoptada fue la tradicional doble cámara en forma de H, en la que dos vasos (cámaras o compartimentos) están conectados por un medio de intercambio protónico, tal como muestra en la Figura 1 [19]. Inicialmente, los reactores utilizaban un puente salino como el canal de intercambio de iones entre el ánodo y el cátodo de la cámara, pero este fue remplazado posteriormente por membranas de intercambio de protones [20]. Muchas de las modificaciones de los modelos existentes se han llevado a cabo buscando aumentar las densidades de potencia, y de mantener una producción de corriente constante [21]. Algunos de los mejores diseños conocidos incluyen un flujo ascendente de tipo tubular [22], un diseño de placa plana [23], un apilado de MFCs [24], y en forma de tubo en U [25].

Las Celdas de Combustible sedimentarias son empleadas en algunos tipos de hábitat naturales donde se obtiene la energía de comunidades bacterianas presentes en el mismo lugar (nativas), tal como describe Lenny en 2008 [26], este tipo de MFC ofrece la alternativa de obtener energía eléctrica, de una manera directa del suelo; ya sea de sedimentos marinos como Scott quien registró densidades de potencia de 55 mW/m² en sedimentos marinos; o partir de cultivos de arroz, entre otros [1].

Las MFC tienen un alto potencial de aplicaciones en distintas áreas incluidas: (i) tratamiento de aguas y recuperación energética; (b) energía renovable proveniente de biomasa; (c) generación insitu en áreas remotas y proveedor de energía de sensores utilizando combustibles biodegradables autóctonos; (d) biorremediación de contaminación del petróleo en las aguas subterráneas [18].

1.3. Membranas en la producción energética

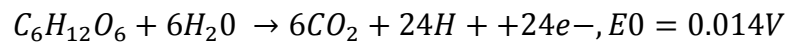
Las membranas cuentan con diversas aplicaciones en la producción energética y diversos bioprocesos. Existen membranas de separación, que se utilizan en la ósmosis reversa, nano-filtración, ultrafiltración y microfiltración, separación de gases, pervaporación; membranas de reactores y membranas de contacto, utilizadas para procesos de destilación y emulsificación.

Gugliuzza en 2014, describió diversas combinaciones de procesos con membranas en la tecnología de energías renovables [27], los más destacados son:

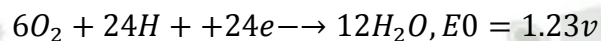
- (i) Energía renovable producto de la desalinización: La energía renovable es utilizada como suministro de energía de la planta de desalinización de membrana; cuyo proceso suele ser de alto consumo energético. Los procesos de membrana como ósmosis inversa, electrodiálisis, y destilación de membrana, pueden ser utilizados en la generación de energía solar, eólica, fotovoltaica (PV), energía de olas y de presión hidrostática
- (ii) Membranas para procesamiento de biocombustibles y para la producción y purificación de biogás: se utilizan las membranas para la filtración y modernización de biogás.
- (iii) Celdas de combustible microbiológicas: la membrana actúa como un separador y electrolito sólido, cuya función es el transporte selectivo de protones a través de la celda, en funcionamiento.

La función ideal de la membrana en las MFC, es separar la reacción de la cámara anódica y catódica, en el sistema electroquímico mientras permite el transporte selectivo de protones del ánodo al cátodo, previniendo la difusión de oxígeno hacia la cámara anódica [18].

Reacción en cámara anódica a partir de Glucosa



Reacción en cámara catódica



Las desventajas de trabajar con membranas en las MFC son el alto costo que añaden al sistema y que pueden influenciar de manera negativa al sistema. Nafion tiene un precio promedio de \$1400/m², a diferencia de una simple membrana de intercambio de \$80/m²; estos costos hacen imposible la utilización de Nafion en aplicaciones a gran escala. A pesar del costo Nafion 117 (dipont Corp.) de 0,019 cm de grosor, sigue siendo la membrana más utilizada por el momento [19].

La estructura base de la membrana Nafion está diseñada para incluir una amplia cantidad de regiones hidratadas, que permitirán una migración eficiente de protones. Nafion es una membrana polimérica, cuya estructura base está formada por un polímero de polietileno, en el cual se reemplaza el hidrógeno con flúor, formando una estructura conocida como politetrafluoroetileno (PTFE); de esta manera Nafion se transforma en una estructura químicamente resistente, estable y duradera. El electrolito se logra añadiendo bisulfito (HSO₃⁻), a la estructura base del polímero PTFE. El bisulfito añadido en su forma iónica es SO₃⁻, se une los protones H⁺. Esta estructura con PTFE hidrofóbico y bisulfito hidrofílico tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de agua [15].

Al hidratarse la membrana, los protones son débilmente atraídos a las regiones SO₃⁻ con alta negatividad electrónica, lo que permite que sean transportados con facilidad. Nafion, se comporta como un elemento lleno de agua, el cual se conecta mediante canales, que corresponderían a los iones SO₃⁻, y la fase líquida móvil correspondería a los iones H⁺ y el agua; los iones H⁻ (u otros iones), pueden moverse libres en estos canales bajo una gradiente de potencial; así mismo al resultar la membrana como un conductor de protones altamente efectivo, logra actuar como un

aislante de electrones. La conductividad de Nafion incrementa exponencialmente con la temperatura, e incrementa de manera lineal con el contenido de agua, como ya se mencionó [15].

Nafion™117, si bien es la membrana más utilizada no es la única. En el mercado también podemos encontrar otras membranas de la familia perfluorosulfónico, como Flemion™ (Asahi Glass), membrana Hyflon™ (Solvay-Solexis, Italy), Zirfon™ (Perl, Agfa), y Aquivion™ (Solvay) [28,29]. Hyflon está compuesta por una cadena lateral corta de perfluoropolímero, y presenta mejor estabilidad química, así como mayor conductividad en comparación a la ya mencionada Nafion [30]. Sin embargo, presenta una resistencia interna más alta que Nafion, lo que repercute en la producción energética. Por último, Zirfon está compuesto de un material órgano-mineral macroporoso, presenta una resistencia específica mucho menor en comparación a Nafion, su mayor desventaja es la alta permeabilidad de oxígeno que presenta es perjudicial para las reacciones anódicas, así como para los materiales filtrantes-porosos [29]. Este tipo de membranas permiten mayor velocidad en el intercambio protónico, y por lo tanto mayor producción energética. Kim en 2007, comparó el desempeño de una membrana CEM, AEM, de micro-filtración (UFM), con Nafion™117, demostrando que la energía producida por otras membranas aún no logran igualar la lograda con Nafion, es por ello que a pesar de ser la de mayor costo, sigue siendo la más utilizada en pruebas de laboratorio [27].

El efecto adverso en el uso de membranas es el incremento en la resistencia interna que lleva a un decaimiento en la producción energética. Otros tipos de materiales de menor costo y mayor accesibilidad han sido utilizados como medios de intercambio catiónico como: telas, fibra de vidrio, nylon, filtros de celulosa, filtros de policarbonato, entre otras; sin mucho éxito [30,31].

1.4. Electrodo

El electrodo debe ser de un material que cumpla con las siguientes características: ha de ser un material conductivo, bio-compatible y químicamente estable en la solución del reactor [32]. El material más utilizado en las investigaciones son los electrodos de carbón en diversas formas como: barras de grafito, fieltro de grafito, tela de carbón, papel carbón, esponja de carbón o espuma, cátodos platinizados a base de

papel carbón revestido, grafito revestido; además de electrodos de otros metales, como titanio y acero inoxidable. La literatura indica que estructuras tipo brush de papel, fieltro y tela, logran una mayor producción que electrodos del mismo material, pero distinta configuración (barras, placas, etc). Sin embargo, estas estructuras suelen ser de mayor precio y de difícil accesibilidad. La modificación de la superficie de los electrodos, así como las aleaciones con metales o el pre-tratamiento, podrían ayudar a mejorar la producción de energía y la reducción de costos [33]. En la Figura 2. Se muestran los materiales de carbón tradicionalmente utilizados como electrodos en las MFCs, donde (a) papel carbón, (b) tela carbón, (c) malla carbón, (d) filtro carbón, (e) placa grafito, (f) grafito granulado, (g) carbono reticulado vitrificado, (h) cepillo carbón [18]

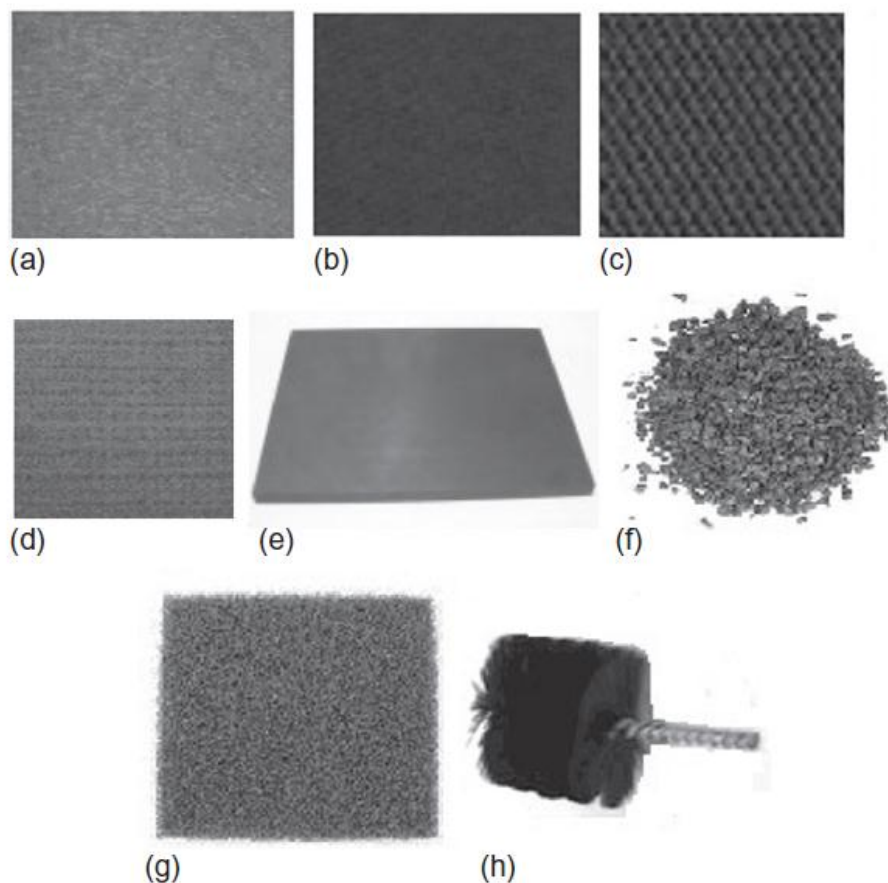


Figura 2. Materiales de carbón tradicionalmente usados como electrodos en MFCs.

1.4.1. Ánodo

Diversos investigadores han demostrado que las características de la superficie del ánodo y su afinidad hacia las bacterias, son factores decisivos en la adhesión bacteriana al ánodo y en las conexiones eléctricas. Con el fin de favorecer esta afinidad, se han desarrollado diversas estrategias, que incluyen modificaciones en los tradicionales ánodos de carbono [18]. Como ya se mencionó el carbón no es el único material utilizado como cátodo, se ha probado que otros metales, tales como: (i) cobre, (ii) titanio, (iii) oro, (iv) acero inoxidable, podrían conducir a una mayor conductividad energética.

- (i) Cobre: Pruebas con electrodos de cobre, demostraron que a pesar de alcanzar una corriente mayor en comparación a una MFC con tela carbón (en la etapa inicial), resulta altamente corrosible y tóxico para los microorganismos, e incluso lleva a una mayor contaminación del efluente tratado [18].
- (ii) Titanio: Fue propuesto especialmente como aceptor de corriente, se realizó una comparación de titanio, titanio-revestido en Pt, y grafito. Los resultados mostraron corriente nula para el titanio no revestido [43].
- (iii) Oro: Los ánodos de oro han sido utilizados en micros-MFC, demostrando ser biocompatibles, de alta conductividad, e idóneo a la micro-fabricación convencional [34,35]. Sin embargo, el oro no resulta un material viable, en temas económicos, ni siquiera como revestimiento.
- (iv) Acero inoxidable: Se considera como un ánodo viable, debido a las mejores propiedades mecánicas en tiempos largos de operación, así como en aplicaciones de escalamiento; en comparación a electrodos de carbono [18].

El acero inoxidable, así como el titanio, presentan problemas debido a la lisa superficie del metal, la cual no permite una adhesión de fuerza sobre las bacterias inoculadas; además de formar óxidos no conductores sobre la superficie [18]. Una lista de materiales de ánodos utilizados en investigaciones, en el Anexo1.

En 2002, y 2003, Park y Seikus desarrollaron ánodos de carbón-metal, por ejemplo: ánodo de grafito-manganeso (iv) y grafito-rojo neutro (NR), siendo la primera combinación la de mejor desempeño; llegando a ser superar incluso, y no por poco, a

los electrodos de grafito normales [33,34]. El fomento de nuevos ánodos basados en materiales compuestos, se encuentra aún en su etapa inicial, diversos investigadores se encuentran en la búsqueda de materiales de bajo costo, estables a largo plazo, y de entender el mecanismo de interacción entre la bacteria y el electrodo [18]. A partir de diversos estudios sobre el ánodo, han surgidos diversas tendencias que podrían incrementar el rendimiento de las MFC; como incrementar la carga superficial del ánodo de manera que afecte directamente la adhesión microbiana y la transferencia de electrones en la superficie del ánodo. Otra tendencia sería la integración con materiales nano-compuestos que ofrecen la ventaja del efecto sinérgico de dos o más componentes y el desarrollo de un ánodo macroporoso 3D que incrementa la interacción ánodo-microbio, convergiendo en una mayor transferencia de electrones [18].

1.4.2. Cátodo

El cátodo suele ser del mismo material del ánodo, mayormente carbón y suele revestirse con metales preciosos tales como platino, cobalto y hierro; cuya función es aumentar la velocidad de reducción del oxígeno [38]. En la cámara catódica se da la captura de electrones, por lo que se necesita un aceptor de electrones en el medio. El oxígeno, es el aceptor más recomendado, debido a su accesibilidad, bajo costo en caso de escalamiento y no toxicidad [32,39]. El medio en el cual se esparce el aceptor, aún no ha sido completamente estudiado, debido a que se da mayor interés al mismo aceptor de electrones, diversos investigadores han utilizado, agua destilada [40], buffer fosfato [41], agua de mar [42], entre otros, sin haber representado influencias significativas en la producción energética. Otros aceptores también han sido ampliamente utilizados como el ferrocianuro, peróxido de hidrógeno, iones férricos y permanganato; dichos aceptores han probado ser grandes conductores de electrones y de producir mayor densidad de potencia. A pesar de ello, el uso de estos aceptores es considerado no sustentable, debido al costo, requerimiento de continuo reemplazo y que puede contaminar la solución tratada a través de la transferencia por el medio separador [19, 43, 44].

1.5. Microorganismos electrogénicos

El factor más importante para que una MFC genere una corriente de electrones que pueda ser utilizada es, sin duda alguna, los microorganismos utilizados para llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica a compuestos como CO_2 , H_2O y la liberación de electrones al sistema [32].

Los microorganismos que pueden oxidar totalmente compuestos orgánicos empleando un electrodo como único aceptor de electrones, son los que contribuyen principalmente a la producción de energía. La diversidad de bacterias con capacidad electrogénica sigue aún en constante descubrimiento; siendo dos los géneros que han cobrado mayor importancia: *Shewanella* y *Geobacter*, la disponibilidad del genoma de ambos géneros ha permitido aprender más acerca de la naturaleza fundamental del fenómeno electrogénico [45]. El análisis de la comunidad microbiana encontrada en los biofilms ha demostrado que existe una mayor cantidad de microorganismos exoelectrogénicos, a la inicialmente esperada.

Una comunidad microbiana óptima para trabajar en una MFC, es obtenida de sedimentos, digestores anaeróbicos, lodos activos de plantas de tratamiento; llegando a producir incluso más energía que los cultivos puros; mientras que los cultivos puros suelen ser obtenidos mediante la aislación de sedimentos de MFCs o mediante la identificación de microorganismos Fe(III) reductores [46]. Usualmente los microorganismos reductores de Fe(III) son altamente efectivos en entregar electrones al electrodo; debido a la capacidad de estos microorganismos de donar los electrones a un electrodo artificial; cabe mencionar que no todos los reductores de Fe(III) son capaces de donar electrones al electrodo; al igual que no todas las bacterias de actividad electrogénica tienen la capacidad de reducir Fe(III) . A pesar de los grandes avances logrados en microorganismos electrogénicos, aún se desconoce el mecanismo de transporte de electrones, de la gran mayoría, desde la célula hacia un aceptor extracelular [19].

1.6. Mecanismos de transferencia de electrones

Las comunidades microbianas ya sean mixtas o puras, forman un biofilm que envuelve el ánodo, es aquí donde se realiza la transferencia de electrones. Existen dos

mecanismos conocidos para la transferencia de electrones al ánodo: transferencia directa vía citocromos tipo *c* de la membrana externa y transferencia de electrones solubles con ayuda de mediadores [47].

Transferencia directa con la participación de citocromos

Microorganismos anodofílicos: *Geobacter* y *Rhodoferax*. Cuentan con mecanismos de transporte de electrones interno y no requieren la ayuda de mediadores [29]. Se conoce que las bacterias que tienen la capacidad de donar electrones hacia un electrodo, utilizan citocromo Tipo-c, como transporte del exterior de las células hacia el electrodo. Los citocromos de Tipo-C son proteínas redox que contiene uno o más grupos hemo, cuya función es el transporte de electrones en la cadena respiratoria de diversos organismos; estas proteínas multihemos, se localizan en la membrana de las bacterias [48]. Este es el caso de *Geobacter sulfurreducens*, que posee más de 100 tipos de citocromos Tipo-C la gran mayoría en su membrana exterior; gracias a ellos es que puede transferir electrones desde su membrana interna hacia la superficie externa celular; sin embargo, poco se sabe acerca del exacto mecanismo de transporte de electrones [18].

La colaboración de distintos citocromos demostró que las bacterias no utilizan el mismo mecanismo para reducir elementos o un electrodo. Por ejemplo, *G. sulfurreducens* forma un biofilm bastante gruesos en el ánodo, cuyas células son metabólicamente activas a través del biofilm, es por ello que se asume que debe tener un mecanismo para transferir electrones hacia el electrodo a unos micrómetros de distancia; es aquí donde entran los pilis o “nanocables” tipo IV [18]. La representación de la transferencia de electrones vía citocromos se muestra en la Figura 3, donde cuadrado abierto: OmS en pili tipo IV, Estrella: OmcZ [18].

Posteriores investigaciones encontraron citocromos localizados a lo largo de los pilis; este descubrimiento nos lleva a suponer que el transporte de electrones podría ocurrir a través de un túnel de electrones vía pili o por el salto de electrones de citocromo a citocromo, usando los pilis como puente entre citocromos [49].

Esta teoría ha sido llamada la Teoría del súper- intercambio y algunos grupos de investigación han encontrado evidencia de su existencia [42]. A pesar de ello, otros investigadores se oponen a esta teoría abduciendo que los citocromos se encuentran

demasiado separados entre ellos por lo que el salto de electrones no sería posible y que los pilis pueden ser conductores aún si los citocromos se encuentran desnaturalizados, es decir; los citocromos en realidad sólo facilitan al pili, la transferencia de electrones hacia el ánodo [18].

Este debate entre grupos de investigadores aún permanece vigente, y probablemente tendrá solución en años venideros, según avancen las investigaciones. *Thermincola ferriacetica*, es otra bacteria con actividad electrogénica; esta bacteria forma gruesos biofilms al igual que *G.sulfurreducens*; por lo tanto también tiene la capacidad de transferir electrones a través de largas distancias; pero a diferencia *G. sulfurreducens*, *Thermicola* es una bacteria Gram-positiva sin citocromos del tipo-C; por lo que se desconoce cómo podría transportar los electrones a través de la pared celular Gram-positiva [50].

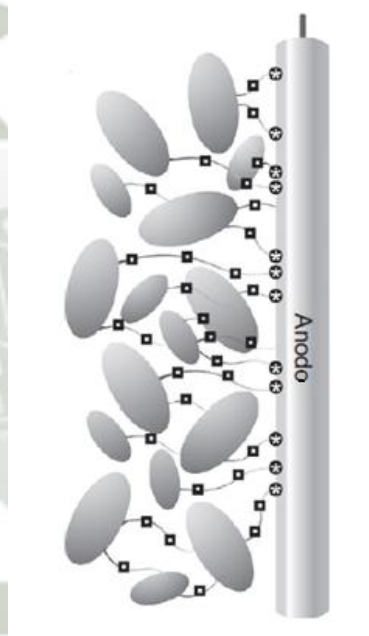


Figura 3. Representación esquemática del biofilm de *G. sulfurreducens* en el ánodo, mostrando la representación de varios citocromos a través del biofilm.

Transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo

El compuesto que actúa como mediador tiene la capacidad de entrar en la célula, aceptar los electrones, desde la célula en estado reducido y los dona a los electrodos. Los mediadores pueden ser producidos por las mismas células o ser añadidos de

manera externa, estos métodos fueron descritos por Scott y Hao en 2016 y se describen a continuación:

(a) Mediadores externos

Son especies redox de bajo peso molecular que sirven para transportar los electrones hacia los electrodos; solían ser añadidos a las MFC rutinariamente. El mediador debía ser soluble, químicamente estable en su estado reducido y oxidado en la solución electrolítica, en estado de oxidación debía poder penetrar la membrana de las bacterias para alcanzar las especies reducidas en su interior, igualar el potencial de reducción del metabolito, sus estados de oxidación no debían interferir con otros procesos metabólicos, además debía poder escapar fácilmente a través de la membrana bacteriana, y ser no apto para la absorción de células bacterianas en la superficie del electrodo [18]. Una gran variedad de químicos ha sido utilizados como mediadores tales como: Rojo neutro; anthraquinone-2-6, disulfonato (ADQS) [18], Tionina [38], Ferrocianato de potasio [51], violeta de metilo [42], 2-hidroxi-1,4-naftoquinona [40], y resazurin [52]. Pero al ser mediadores artificiales presentan la desventaja de que podrían resultar tóxicos hacia las bacterias, además de aumentar el costo de la MFCs y de alejar a las MFCs de una aplicación industrial debido a que podrían llevar a una contaminación del efluente tratado [19]

b) Mediadores secretados por bacterias

En 2005 Rabaey y colegas, demostraron que no era necesario el uso de mediadores externos debido a que las mismas comunidades microbianas (mixtas o puras), podrían producir mediadores endógenos que resultarían en excelentes transportadores de electrones [22]. Los mejores mediadores excretados por bacterias electrotóxicas son derivados de fenazina producidos por *Pseudomonas aeruginosa* como: piocianina (PYO) y fenazina-1-carboxamida; y flavinas producidas por *Shwanella* como: riboflavinas (vitamina B2, RF) y flavina mononucleótidas (FMN) [18]. Además, las flavinas pueden interactuar con otros microorganismos y generar corriente eléctrica en microorganismos considerados no-electrogénicos; tal es el caso de *Bacillus sp.*, y levaduras [53]. Los distintos tipos de transferencia de electrones, se muestran en la Figura 4 mediante un resumen esquemático de los dos mecanismos de transferencia para el uso de un aceptor de electrones de estado sólido.

Las flechas invertidas representan la absorción de electrones de un donante de electrones de estado sólido. (1a) Un microorganismo puede realizar EET poniendo directamente en contacto el electrodo con redes de redox u otras moléculas de transferencia de electrones, (1b) Variación de 1a en la que los nanocables conductores permiten la transferencia de electrones a distancias micrométricas. En este último mecanismo aún no se han observado reacciones de absorción de electrones. (2a) Un microorganismo puede utilizar una lanzadera de electrones o el transporte de electrones hacia / desde la célula. Las moléculas segregadas por microbios, así como los compuestos artificiales añadidos, pueden actuar como lanzadera electrónica. (2b) Variación en 2a donde los electrones son transferidos por metabolitos primarios tales como H_2

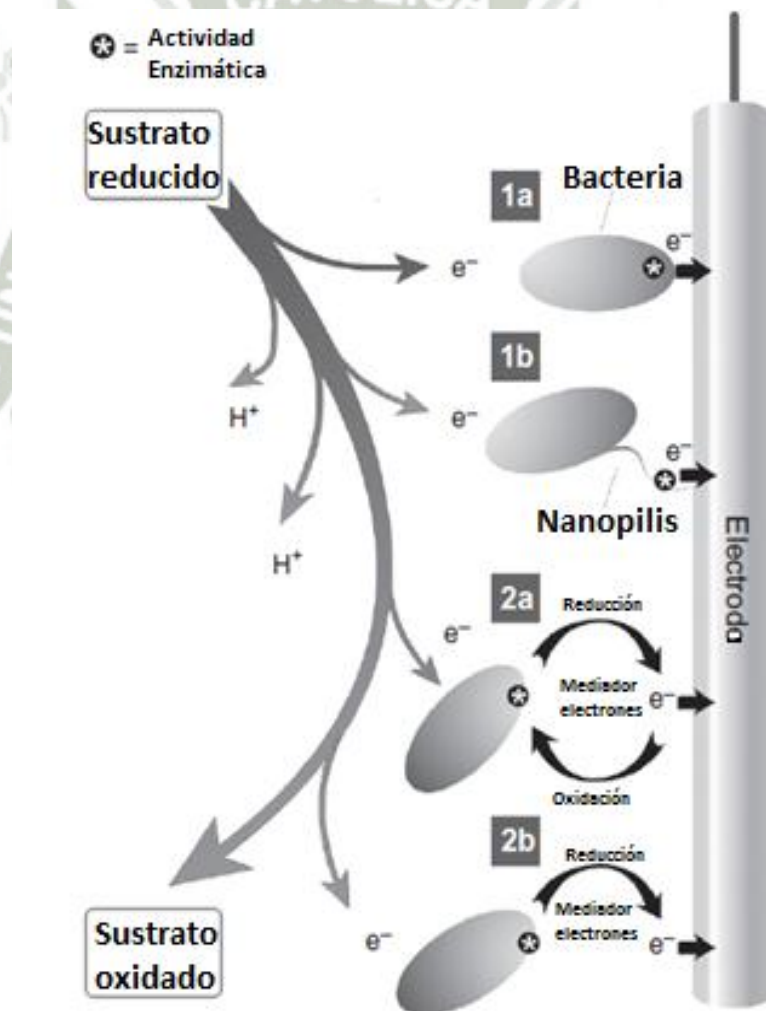


Figura 4. Mecanismos de Transferencia de electrones. [18]

Modificaciones en la membrana celular

Un nuevo método de transporte de electrones, ha sido desarrollado mediante la introducción de oligoelectrolitos conjugados (COEs), en las MFCs. Los COEs se integran a la membrana de las bacterias, por lo que no puede ser considerado como mediador [54,55].

El mecanismo de funcionamiento de los COEs aún no se encuentra claro, pero se supone que los COEs pueden transportar electrones a través de sus π -orbitales presentes en anillo aromático presente en la estructura de la molécula. Mediante la intercalación de COEs en la membrana, los electrones pueden dejar la cadena respiratoria, sin importar el terminal de electrones presentes en la membrana. Otra teoría indica que los COEs deforman la membrana celular, de manera que se da un mejor transporte de electrones [56].

1.7. Inóculos de cultivos bacterianos puros

La bacteria *Geobacter metallireducens*, electrogénica comprobada [39], es probablemente la más conocida y la más estudiada, de todas las bacterias electrogénicas descubiertas. Las bacterias del género *Geobacteraceae* tienen la capacidad de transferir electrones insolubles tales como Fe (III), lo cual sugiere que las superficies de los electrodos actúan como receptores de electrones [31]. Esta capacidad del *Geobacteraceae* de transferencia de electrones, se debe a tres habilidades: a) habilidad de oxidar completamente los donadores de electrones usando únicamente un electrodo como aceptor de los mismos; (b) puede realizar la transferencia de electrones a electrodos aún en ausencia de mediadores; (c) la unión de la población de la células a los electrodos, hacen que las velocidades de transporte de electrones sean similares a las reportadas a las observadas en el transporte de electrones al citrato de Fe(III) [42]. Vale agregar que las bacterias del género *Geobacter* logran acoplar la respiración anaeróbica a la reducción de metales en el ambiente, pudiendo remediar varios metales pesados tales como: Uranio (VI), Vanadio (VI), Cromo (VI); e incluso biorremediar contaminantes orgánicos como hidrocarburos monoaromáticos [31,40].

Otras bacterias electrogénicas comprobadas serían usadas sin mediadores son: *Clostridium beijerinckii*, *Clostridium butyricum*, *Desulfotomaculum reducens*,

Rhodobacter capsulatus, *Thiobacillus ferrooxidans*, e incluso bacterias del género *Geovibrio* y *Rhodoferax ferrireducens*. A pesar del numeroso grupo de bacterias electrogénicas, la eficiencia de muchas de ellas, aún se encuentran muy por debajo de las inicialmente mencionadas, debido a la competencia entre las mismas funciones celulares características de las mismas bacterias, dejando en segundo plano la transferencia de protones y posterior generación energética. Son pocos los estudios comparativos realizados respecto al uso de consorcios bacterianos y cultivos puros, debido a la dificultad de aislar bacterias electrogénicas comprobadas y al alto precio de los medios requeridos para el aislamiento; lo que hace casi imposible el uso de cultivos bacterianos puros en la ingeniería del mundo real [39, 47, 57].

El segundo género de electrogénicas más utilizada es *S. putrefaciens*, esta bacteria ha demostrado mayor estabilidad en el funcionamiento, que el género *Geobacter*; si bien no alcanza el rendimiento aún superior de este último, debido a su estabilidad se considera a *Shewanella* como idónea en la industria de biosensores [19].

1.8. Inóculos de consorcios bacterianos

Los cultivos mixtos utilizados como inóculo pueden llegar a generar mayor energía en comparación al empleo de ciertos cultivos puros, esto se debe a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo y a la participación de cepas con capacidades metabólicas complementarias [57].

Algunas ventajas de trabajar con consorcios bacterianos, es la robustez del sistema, dando mayor flexibilidad en cuanto al tipo de sustrato utilizado, mayor resistencia al cambio de temperatura, y la posible simbiosis bacteriana que podría significar una mayor degradación de sustratos; así como una mayor transferencia iónica [39]. El inóculo puede provenir de lodos activos [58], lodos anaeróbicos [22], aguas residuales domésticas [59], aguas residuales industriales [60], sedimentos marinos [42] o sedimentos acuáticos [61]. Aunque los mejores resultados se han obtenido empleando lodos de plantas de tratamiento

Sin embargo qué especies o como llegarán a poblar el ánodo, se mantiene aún como un misterio; pero se sabe que tendrá influencia directa en la producción energética; así como en el tratamiento de residuos, evaluado mediante COD, esta simbiosis de microorganismos puede influir de manera positiva o negativa en el rendimiento

energético de una MFCs; se sabe también que el uso cultivos mixtos pueden llevar a una remoción más rápida de sustrato, sin tener como resultado , en algunas ocasiones, la producción energética [19].

1.9. Lodos activos de plantas de tratamiento de agua potable como fuente microbiana electrogénica

Los lodos producidos durante el tratamiento de agua contienen óxidos-hidróxidos metálicos y contaminantes orgánicos e inorgánicos como: microorganismos, arcilla y arena, y son recolectados en la etapa de floculación y sedimentación. En la Figura 5, se muestra el diagrama de flujo de una planta convencional de tratamiento de agua potable. La calidad de este tipo de inóculo varía mucho dependiendo de su origen, época de recolección de la muestra y la planta en la cual se realiza el tratamiento.

Los microorganismos que conforman los lodos son bacterias metanogénicas, fermentativas y sulfa-reductores. Entre ellas destaca la presencia de bacteria del género *Geobacter*, *Methanobacteriaceae*, *Shewanella*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Desulfuromonaceae*, *Alteromonadaceae*, *Enterobacteriaceae*, *Pasteurellaceae*, *Aeromonaceae*, *Comamonadaceae*, las cuales tendrían cierta actividad electrogénica; también se encuentran *Legionella pneumophila*, *Aeromonas*, *Mycobacterium*, *Flavobacterium*, *Naegleria fowleri*, *Acanthamoeba* spp., *Clostridium perfringens* [57]. Este tipo de inóculo suele ser utilizado en los procesos de digestión anaeróbica en la producción de biogás, logrando notorios resultados [62]. Debido a la presencia de bacterias patógenas, así como el elevado número de metanogénicas presentes, diversos autores sugieren tratar los lodos activados e inhibir patógenos y metanogénicas [3,63].

1.10. Sustratos en celdas de combustible microbianas

La materia orgánica residual de diversos orígenes, resulta hasta ahora la alternativa de sustrato más atractiva, debido a la alta carga orgánica que contiene, y más importante aún, que al tratarse de efluentes de desecho, se estaría ayudando en el tratamiento de tales aguas, al mismo tiempo que se genera energía eléctrica [64]. Se ha reportado una relación directamente proporcional entre la carga orgánica presente en el sustrato y la producción energética que da lugar a producción energética e incluso a

un balance económico positivo [29]. Entre los sustratos utilizados podemos encontrar efluentes de desecho provenientes de: industrias lácteas [65], industrias cerveceras [66], origen agrícola [67], derivadas de la melaza [68], la producción de aceite de palma [69]; entre otros.

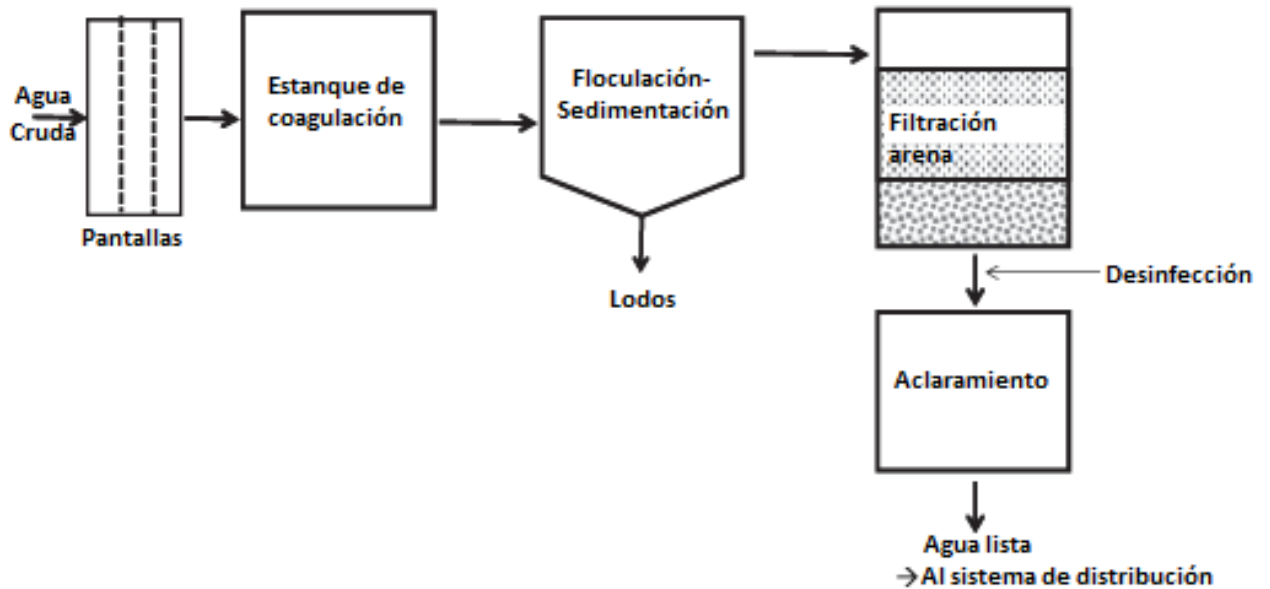


Figura 5. Diagrama de flujo de una planta convencional de tratamiento de agua potable

Recientes investigaciones han demostrado que cualquier componente degradable por bacterias puede ser convertido en electricidad. El rango de componentes que podían utilizar como posibles sustratos es bastante amplio, la lista incluye: acetato, glucosa, almidón, celulosa, paja de trigo, piridina, fenol. Estos últimos suelen ser añadidos, con fin de enriquecer el sustrato elegido, y favorecer el crecimiento inicial bacteriano [39]. En el Anexo 2. Se muestran una tabla de diversos microorganismos, así como el sustrato utilizado para su desarrollo.

1.11. Agua residual sintética en MFC

El agua residual sintética, es un medio fabricado en el laboratorio que emula la composición básica de aguas residuales, este medio suele ser utilizado en el estudio de MFCs a nivel laboratorio, presentan la ventaja de permitir reproducir de manera exacta las condiciones del medio, dando mayor confiabilidad a las comparaciones entre sistemas, en especial en estudios que modifican el diseño o aquellos que prueban

inóculos de nuevas bacterias que se presumen podrían tener un potencial electrogénico.. MFCs han demostrado altos porcentajes de remoción de carbón de agua residual sintética, 90% aproximadamente, utilizando como fuente de carbono, glucosa, sucrosa, acetato y xilosa; siendo mayor que la obtenida en sustratos de origen natural que alcanza una remoción entre 70%-86% [29,70,71,17].

1.12. Diseño de MFC

Existen diversos diseños de MFCs, la arquitectura de cada uno de ellos se desarrolla en relación a los objetivos de la investigación a desarrollar. Dentro de los diseños más estudiados encontramos: Cátodo aire, SCMFC, dos cámaras, Bushing MFC, Reactores tubulares de lecho empacado, MFC apiladas, MFC de bio-hidrógeno.

a) Cátodo Aire

Este diseño excluye el uso de una bomba de aireación, presentando una aireación de manera pasiva, gracias a la exposición del cátodo al ambiente. Liu y Logan en 2004, presentaron uno de los diseños más efectivos de cátodo aire, un reactor en forma de cubo (Figura 6). Este diseño también utilizó una membrana de intercambio catiónico, la cual fue adherida al cátodo con calor (140°C a 1780 kPa por 3 min). Sin embargo se desconoce como este tratamiento de adhesión podría afectar a la calidad de la membrana, desencadenando repercusiones negativas en la producción energética. Es por ello que Liu y Logan, probaron el sistema cátodo aire en ausencia de membrana, los resultados no fueron los esperados, la producción de energía sufrió una disminución en más de un 50% [19].

Siguiendo el concepto del reactor cubo, Kim en 2007 desarrolló un sistema de dos cámaras con cátodo de aire, este sistema fue desarrollado específicamente para la comparación de distintos medios de intercambio (AEM, Nafion, entre otros); y obtuvo resultados bastante similares a los obtenidos en los sistemas de una sola cámara, anteriormente mencionados de 514- 610mWm². El último diseño que ha surgido a partir del concepto del cátodo aire, es la Botella Reactor MFC, este diseño se desarrolló con el fin de trabajar cultivos puros que necesitan ser autoclavados y esterilizados de manera constante. En la Figura 7 se muestra una botella reactor, conformada por una botella del tipo uni-cámara, y un brazo lateral; este brazo fue diseñado con un diámetro considerable, de esta manera los investigadores buscaron

incrementar la transferencia de oxígeno hacia el cátodo, este brazo se instaló la membrana de intercambio. Estos sistemas lograron una producción de 1430 mW/m², añadiendo catolitos del tipo Pt o CoTMPPP [19].



Figura 6. Reactor en forma de cubo con cátodo aire



Figura 7. Reactor uni-cámara, cátodo aire con brazo lateral.

b) SCMFC

El concepto de SCMFC (SingleChamberMicrobiologicalFuelCell), desarrollado por Liu y colaboradores en 2004, fue el primero que logró insertar el concepto de una

MFC, en el tratamiento de aguas residuales. Este diseño se basó en un diseño tubular con cátodo aire, el cátodo fue localizado en el centro del tubo de acrílico con ocho barras de grafito dispuestos de manera concéntrica alrededor del cátodo (Figura 8). La membrana fue adherida al cátodo, siguiendo el tratamiento de calor anteriormente mencionado, este reactor logró 80% de disminución de DCO y producción energética similar a la obtenida en los reactores, cubo. [19]

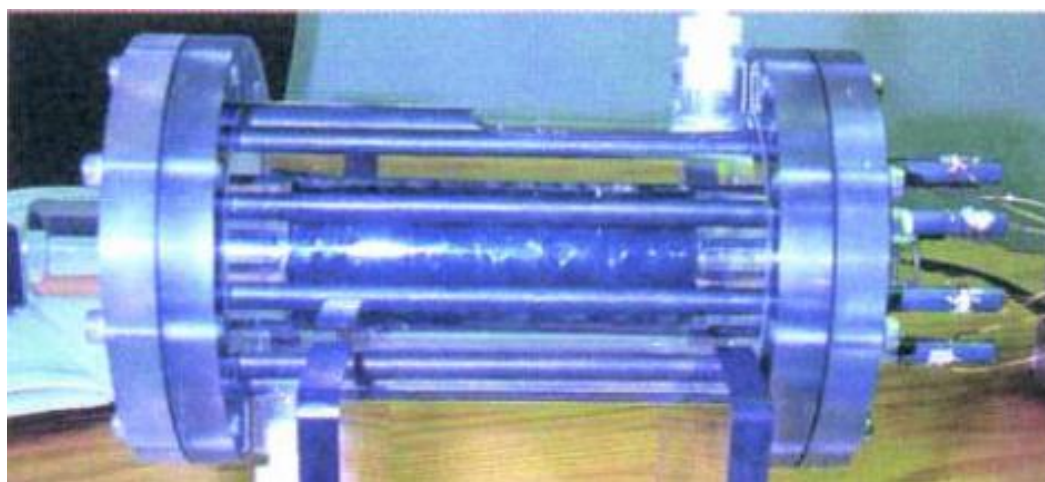


Figura 8. Reactor tipo SMMFC

c) **Dos cámaras (Tipo H)**



Figura 9. Diversas configuraciones de MFC de dos cámaras.

El diseño más simple y conocido de las MFC es el diseño tipo H, consiste en dos cámaras unidas por un medio de intercambio (puente salino, membranas de intercambio u otros), cátodo suspendido en agua el cual es rociado con aire de manera continua. Este sistema es el más utilizado por los investigadores que enfocan sus investigaciones únicamente en la producción energética, y presenta varios desafíos como el consumo energético producto de la implementación de bombas de aireación. En la Figura 9 se muestran varios tipos de MFC del tipo H. (A) Sistema con dos cámaras ambas con conexión para esparcimiento de gases, el ánodo con nitrógeno para mantener las condiciones anaeróbicas, y el cátodo con aire. (B) El tamaño de PEM puede ser incrementado con el fin de aumentar la producción energética. Desventajas, en el precio y difusión de oxígeno. (C) Reactores modificados para mantener las condiciones anaeróbicas en ambas cámaras. (D) Diseño simple de una botella crimp-top con un puerto simple de muestreo en la cámara anódica. [19]

d) Bushing MFC.

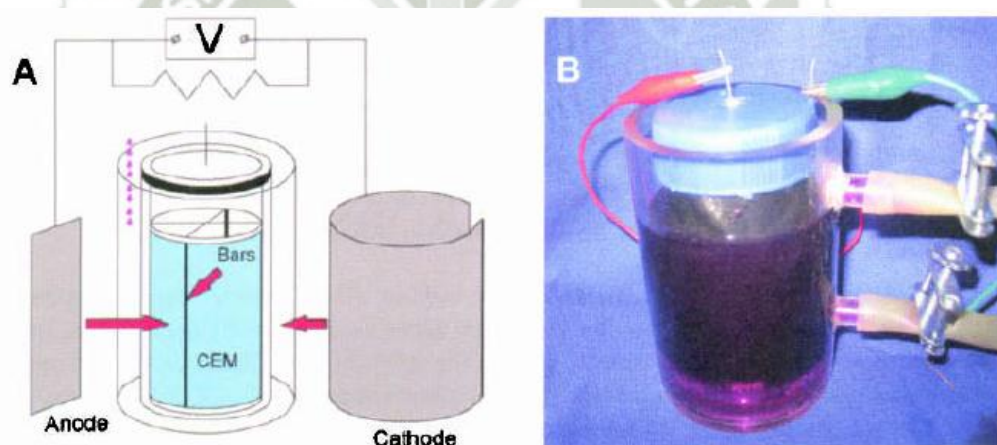


Figura 10. Bushing MFC presentado por You en 2006

Este modelo fue insertado por You en 2006, utilizando permanganato de catolito. El modelo se construyó con un envase circular en cuyo interior se colocaron 4 barras, las cuales contenían al elemento PEM; el cátodo fue insertado de forma concéntrica dentro del envase y logró una producción de 3990 mW/m² de densidad de potencia, valor significativo. En la Figura 10 se muestra el diseño del Reactor bushing diseñado por You en 2006, que utilizó como catolito permanganato, (B) se muestra la fotografía del diseño elaborado.

e) Reactores tubulares de lecho empacado

Este tipo de MFC fue específicamente diseñado para poder ser operados bajo flujo continuo y aumentar el volumen de los efluentes tratados; fue insertado por Liu en 2004. Una de las desventajas de este tipo de sistema es que si la materia orgánica no es eficientemente removida en la cámara anódica, seguirá su rumbo hacia la cámara catódica, creando una demanda de oxígeno y el efluente dejará el sistema sin ser tratado. En la Figura 11 se muestran dos tipos de MFCs tubulares. (AyB), (C). (A) Esquema y (B) es la fotografía del sistema empacado con flujo ascendente para recirculación, con PEM con inclinación. (C) Esquema de sistema empacado con flujo ascendente, PEM colocada en forma U y grafito reticulado [19].

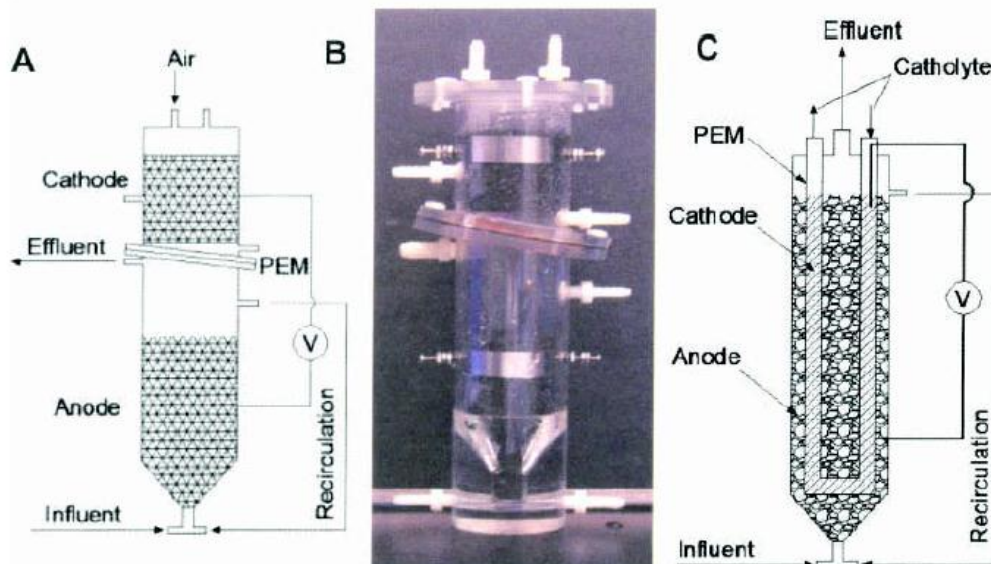


Figura 11. Reactores tubulares de lecho empacado

f) MFCs apiladas

Un sistema MFC a pesar de los diversos avances, sigue produciendo un bajo voltaje que muchas veces imposibilita una derivación de la energía en una aplicación práctica. Por este motivo, surgieron las celdas apiladas conectadas en series con el fin de incrementar el voltaje final gracias a las conexiones seriadas e incluso paralelas. Estos sistemas aún bajos las mismas condiciones, al ser monitoreados de forma individual presentaron diversos voltajes por celda, con incluso datos negativos de voltaje. Este comportamiento aún no ha sido estudiado con profundidad, pero es necesario comprender tales fenómenos para lograr una mejora sustancial en la producción energética final [19]. En la Figura 12 se presenta un sistema de celdas de combustible

apiladas, donde (A) es la fotografía del diseño presentado por Aelterman en 2006, mientras que (B) y (C) son los diseños de las cámaras individuales que conforman el sistema apilado.

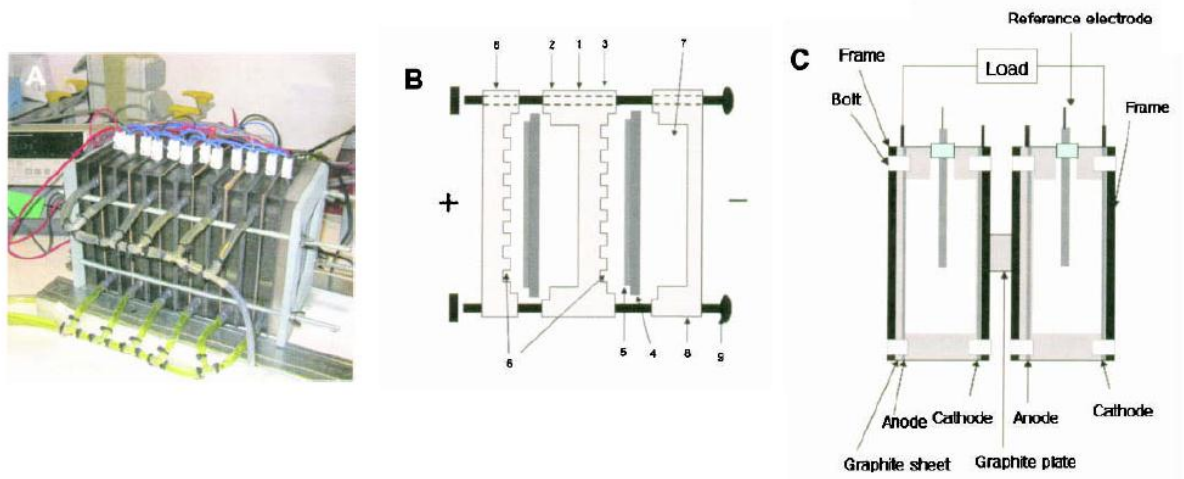


Figura 12. Fotografía y esquema de MFC apiladas

g) MFCs de bio-hidrógeno

Schofer y colaboradores introdujeron las MFC para la generación de H_2 a partir de la fermentación bacteriana. Este tipo de sistema podría ser considerado como una celda de combustible de hidrógeno, pero debido a la presencia bacteriana es considerada como una MFC. La corriente y la densidad de potencia alcanzada por este tipo de sistemas pueden resultar bastante más elevadas que aquellas alcanzadas por MFCs tradicionales. Sin embargo este sistema presenta diversas desventajas tales como: sustrato no presenta una degradación completa, tan sólo un 17% del sustrato es transformado en hidrógeno. Con el fin de incrementar la oxidación del sustrato Rosenbaum introdujo en 2005 las fotobiológicas MFCs; presentando densidades de potenciales significantes; lamentablemente este sistema depende de la luz solar para su funcionamiento y no logró alcanzar los niveles de oxidación de sustratos alcanzado por las MFC tradicionales. En la Figura 13, se muestra en (A) un esquema de una MFC de biohidrógeno, donde en el primer vessel se da el proceso de fermentación, mientras que en el segundo se da la generación de electricidad. (B) Fotobiological MFC desarrollada por Resenbaum en 2005. (C) Reactor desarrollado por Logan en 2006. [19]

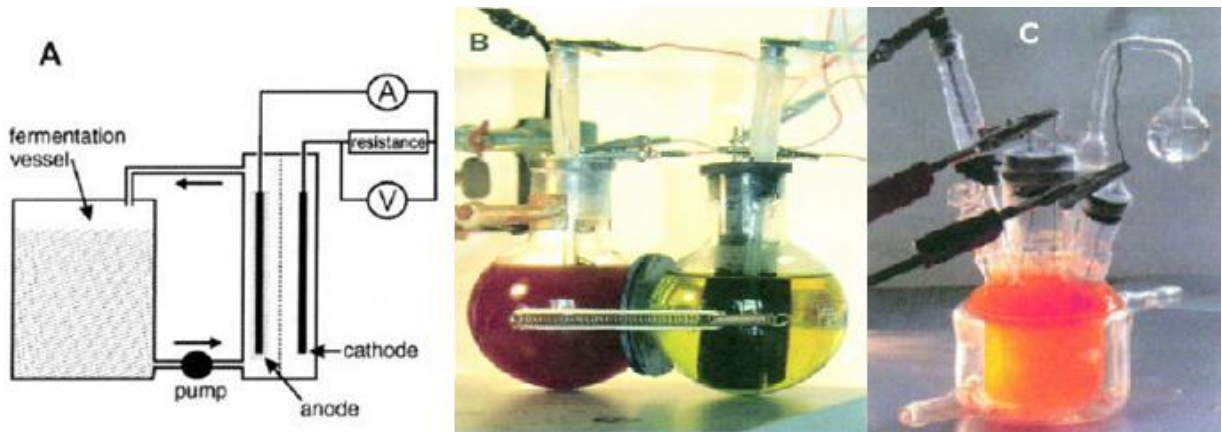


Figura 13. Diseños de MFC para la producción de Bio-hidrógeno

El diseño de los sistemas MFC, en esta investigación se basó en el modelo de celda tipo H, el modelo más usado y de mayor eficiencia, hasta ahora presentado [72], se planteó como medio de intercambio el uso de una membrana de intercambio protónico (PEM), NafionTM 117 de 183 μm de porosidad; considerada adecuada para el intercambio protónico. Debido al alto precio de la PEM los diseños fueron realizados sólo en escala de laboratorio [73].

A pesar de los costos ya sean energéticos y económicos, se considera necesaria la implementación de sistemas de flujo continuo, con el fin de tratar mayores volúmenes de efluentes [74]. El flujo continuo trae la desventaja de la necesidad de implementar bombas peristálticas que, alimenten de manera continua a los sistemas. El gasto de estas bombas puede muchas veces superar la producción energética de las MFC, es por ellos que diversos investigadores tienen a excluirlas de sus diseños. Fangzhou en 2011 implementó un sistema de flujo continuo en ausencia de bombas, pues se basó en un sistema por gravedad, colocando las distintas cámaras en distintas alturas, similar al utilizado en los equipos médicos, sin notorios resultados.

1.13. Diseño celdas de combustible en ausencia de membrana de intercambio protónico. (ML- MFC)

Inicialmente se tomó la membrana como un medio necesario para la separación entre las cámaras anódicas y catódicas, lamentablemente el uso de estas membranas resultó en más de un problema operacional (Otras configuraciones y su desempeño, se muestran en Anexo 3). El elevado costo, la transferencia retardada de protones, que

resulta en la acumulación de iones cargados negativamente en la cámara anódica, y el aumento de la resistencia interna en MFCs, afectan negativamente el rendimiento de MFCs [75].

Expuestas estas dificultades, diversos investigadores intentaron remover o reemplazar dicho elemento por otros de mayor accesibilidad y menor costo, sin modificar la estructura básica tipo H [46, 31,39]. Algunos de los separadores alternativos, se construyeron a base de fibra de vidrio, telas, nylon, filtros de celulosa, filtros de policarbonato, etc. [75,76].

No obstante dichas nuevas membranas no logran alcanzar la energía producida por los sistemas de “membranas no alternativas”, que logran 461 mV, 248 mV [48,65], baja en comparación a los 850 mV alcanzados por Tardosky en 2009 utilizan un sistema tipo H con membrana Nafion 117. Es por ello que la nueva tendencia indica la remoción total del elemento responsable del intercambio catiónico; siendo dos los diseños de mayor expectativa:

- a) Celdas de Combustible Microbianas en ausencia de PEM de una sola cámara, en la cual la cámara anódica y catódica, se encuentran en contacto. Este sistema al mantener en contacto ambos medios, presenta una alta difusión de oxígeno, perjudicial para las reacciones microbiológicas, en su mayoría anaeróbicas; también se presenta la difusión de sustrato y menor eficiencia colúmbica [17, 77,78].
- b) Celdas de Combustible Microbianas unidas por un lazo electrolítico. Este sistema aún no ha sido muy estudiado, sin embargo presenta prometedores avances. Fue Viridis y sus colegas en 2008 quienes propusieron el modelo de lazo en las MFC, este modelo pionero fue utilizado para remover carbón y nitrógeno presente en aguas de desecho. En este modelo probaron que es posible la transferencia a través de un lazo electrolítico, de la cámara anódica hacia la cámara catódica de H^+ and NH_4^+ [47].

Citando las Palabras de Viridis (2008). “Aquí está la hipótesis, los MFC pueden operar suavemente con flujo continuo de electrolito (de la cámara del ánodo a la cámara del cátodo), en lugar del uso de la membrana de intercambio iónico, para realizar la transferencia protones” [79,40].

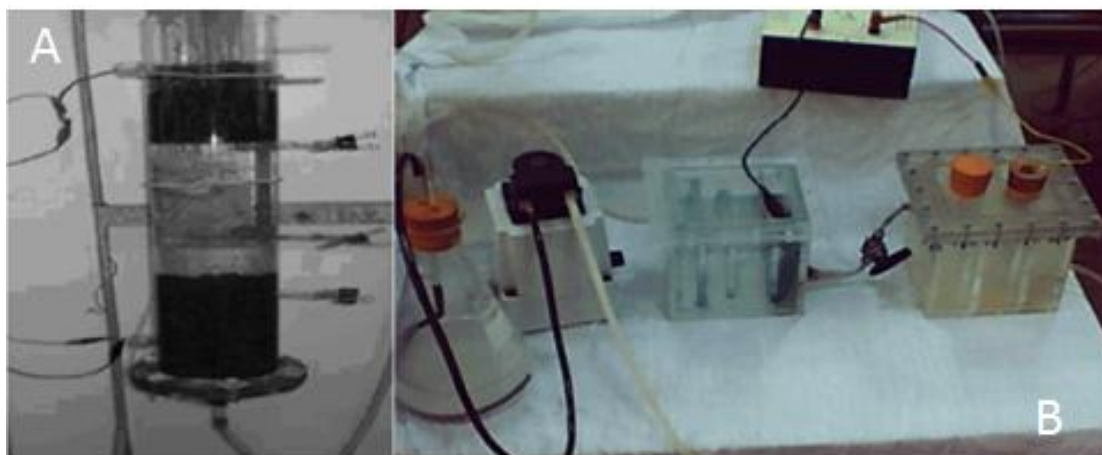


Figura 14. Celdas de combustible microbianas en ausencia de PEM.

A partir de la teoría de Virdis (2008), se diseñó el sistema utilizado en la siguiente investigación que dejó como único medio de intercambio protónico, el lazo electrolítico, este sistema presenta mayores facilidades en el escalamiento; así como mayor energía producida, cabe mencionar que en 2013 Wang reportó que la degradación del sustrato se daba en ambas cámaras; por lo que permite trabajar con mayores volúmenes de efluentes y por lo tanto mayor producción energética [71, 80].

El diseño del presente trabajo, tomó referencia el diseño realizado por Du Fangzhou en 2011, el cuál utilizaba un lazo electrolítico con válvulas médicas, como medio de transporte de electrones y un sistema similar al utilizado de los sueros fisiológicos, como impulsor del flujo del sistema. Este sistema alcanzó 160.7 mV con un resistor de 1000 Ω y un pico de 24.33 mW/m³ de densidad de potencia. Tardast en 2012, realizó un diseño similar, usando el lazo electrolítico, logrando 490mV y 80.129 mW/m³ de densidad de potencia; superando la producción reportada por Du Fangzhou. Ambos investigadores guardaron reserva acerca de mayores especificaciones en los diseños presentados; por lo que el diseño presentado en la siguiente investigación es de creación propia. En la Figura 14, se puede apreciar los sistemas en funcionamiento de ambos investigadores, donde (A) Modelo de Du Zhuwei *et al.* 2008, de una sola cámara. (B) modelo de Tardast 2012, dos cámaras unidas por un lazo electrolítico.

1.14. Electricidad, Corriente eléctrica

El desempeño de una MFC se puede evaluar mediante diversos factores, como diferencia de potencial, densidad de corriente (j), potencia (P), y corriente (CE). El concepto básico de electricidad es la carga eléctrica. La carga se define como la propiedad eléctrica de las partículas atómicas, medida en Coulombs. La capacidad de la carga para poder realizar un trabajo, se llama Potencial. En una batería o celda convencional se tienen dos cargas distintas, por lo tanto, existe diferencia de potencial o también llamado tensión o voltaje [81,82].

La unidad básica de la diferencia de potencial es el vol (V), y es definido como la energía requerida para mover una carga unitaria a través de un elemento conductor [81]. En un elemento conductor, los electrones libres son cargas que podemos poner en movimiento; la corriente es el agrupamiento de electrones, producto de la aplicación de la diferencia de potencial, desde el punto de carga negativa Q^- , hacia el punto de carga positiva Q^+ , a través de un elemento conductor. La corriente se encuentra representada por el símbolo I , siendo su unidad básica el ampere (A) [83].

Las celdas de combustible microbianas, corresponden al mismo principio que las celdas electroquímicas y baterías, las cuales producen corriente continua o directa; llamada así por la corriente presente en el circuito o conductor que se mueve en una única dirección. El movimiento unidireccional es provocado por las fuentes de voltaje, ya sea celdas o baterías, que mantienen la misma polaridad en su voltaje de salida [84].

El circuito eléctrico para ser considerado como tal, debe estar formado por un dispositivo que cree una diferencia de cargas; que en este caso sería las celdas de combustible microbianas; y un circuito por el cual se realiza el paso de electrones; como un cable de cobre [84].

1.15. Circuitos en serie

Los circuitos en serie conectan entre sí varias baterías o celdas, de manera continua; dando un solo camino a la energía eléctrica. Estos circuitos se caracterizan por que la intensidad de la corriente es la misma en todos los lugares del circuito, a diferencia de la tensión (voltaje), que Aelterman en 2006, describe que existen pérdidas de manera

individual por celda al ser unidas, por lo que el voltaje final obtenido, no siempre resulta en la suma de los voltajes individuales. Este tipo de circuito en MFC ha sido estudiado en muy pocas investigaciones, por lo que aún se desconoce las causas de la pérdida de voltaje e incluso la presencia de voltaje de inversión; algunos investigadores especulan que la causa de dichas anomalías radica en la misma naturaleza biológica de los sistemas y que podría ser contrarrestada con la implementación de un diodo a los sistemas. Una conexión seriada se define como:

$$VT = V1 + V2 + \dots + Vn$$

$$IT = I1 = I2 = \dots = In$$



Capítulo II

2. Materiales y Métodos

2.1. Lugar de ejecución y recolección de muestras

La presente investigación fue realizada en las instalaciones de la Universidad Católica de Santa María, en los laboratorios F-402, H-101 y H-402. Las muestras de lodos activados fueron obtenidas de la planta de tratamiento de aguas “La tomilla”.

2.2. Materiales

2.2.1. Vidrio

1. Balones de 250 mL y 500 mL
2. Erlenmeyers 250 mL y 500 mL
3. Vasos de precipitados 250 mL y 500 mL
4. Probetas 10 ml, 100 ml, 500 mL y 1000 mL
5. Baguetas
6. Pipetas 1mL, 5mL y 10 mL
7. Propipetas
8. Micropipetas 10 uL, 100uL y 1000 uL
9. Tips diversos para micropipetas
10. Frascos de vidrio esmerilados
11. Botellas de vidrio 1L
12. Varillas de vidrio de 0,6 cm
13. Varilla de vidrio de 1,2 cm

2.2.2. Unidades Biológicas

1. Lodos activos

2.2.3. Reactivos Químicos y Bioquímicos

1. Fosfato monopotásico, grado reactivo analítico, Merk.
2. Fosfato de sodio dibásico heptahidratado, grado reactivo analítico, Merk.

3. Cloruro de Amonio, grado reactivo analítico, Merk.
4. Cloruro de Calcio, grado reactivo analítico, Merk.
5. Sulfato de Magnesio, grado reactivo analítico, Merk.
6. Cloruro de hierro hexhidratado, grado reactivo analítico, Merk.
7. Hidróxido de sodio, grado reactivo analítico, Sigma.
8. Cloruro de Sodio, grado reactivo analítico, Merk.
9. Peptona
10. Glucosa
11. Ácido Clorhídrico concentrado, grado reactivo analítico, J. Baker.
12. Ácido Sulfúrico concentrado, grado reactivo analítico, Merk.
13. Peróxido de hidrógeno, Erza
14. Agua destilada
15. Viales de digestión COD, Hach
16. Solución estándar COD, Hach
17. Alcohol grado medicinal 96%

2.2.4. Instrumentación y Equipos

1. Multiparámetro, Hanna Multiparameter H9829
2. Multímetro, Keysight *Technologies* U1272A
3. Adquisitor de Datos, Keysight *Technologies* 3472A LX1 Data Acquisition/Switch unit
4. Reactor digital COD, DRB200, Hach.
5. Colorímetro portátil, Hach.
6. Balanza analítica de cuatro decimales
7. Estufa
8. Autoclave
9. Cámara de flujo laminar
10. Cintas pH

2.2.5. Otros

1. Cables de cobre
2. Caimanes
3. Barras de Grafito

4. Unión universal de 1 ¼ pulgada
5. Llaves de tres vías de uso médico
6. Llaves de tres vías con sonda
7. Equipo de venoclisis, de uso médico
8. Jeringas de 1mL y 5 mL
9. Parafilm
10. Cinta aislante
11. Manguera de pecera
12. Bombas de aire de pecera
13. Bombas peristálticas de pecera
14. Filtros de salida de gases
15. Envases plásticos de cierre hermético de 560 mL
16. Envases plásticos de cierre herméticos de 1L
17. Planchas de isopropileno expandido de 10 cm x 30 cm x 90 cm
18. Resistencias de 1 Ω
19. Lija para metal
20. Soldimix
21. Moldimix
22. Cinta teflón
23. Barras de silicona
24. Pistola de silicona
25. Mini-ventilador portátil, casa&ideas

2.3. Recolección y tratamiento del material biológico.

En el presente trabajo se utilizó un inóculo bacteriano proveniente de lodos activos de la planta de tratamiento de aguas en la Tomilla, Arequipa. El inóculo de aproximadamente un litro, fue entregado por personal de la planta y conservado a 4°C, hasta su uso.

Según las características de los lodos fueron considerados dos caminos a seguir, a) realizar la inoculación de las MFCs directamente con los lodos sin tratamiento alguno [70]; b) realizar una filtración en un matiz de 1mm y posterior calentamiento a 100°C

por 15 minutos y enfriar a temperatura ambiente [85]. El tratamiento (a), se sigue en caso de lodos sin mucha carga orgánica, se procede a la inoculación de forma directa. En caso de encontrar partículas de gran tamaño, así como olores fuertes. Se procede al tratamiento (b), el cual facilitará la degradación de la carga orgánica, así como, inhibirá parte de las bacterias presentes, quitando la competitividad posible entre las mismas [86]. Tras la caracterización inicial de los lodos recolectados, se decidió por el tratamiento (a), es decir la inoculación directa, la cual se realizó a una concentración de 10ml/L, 12 horas antes de iniciar el funcionamiento continuo de las celdas, [70].

2.4. Tratamiento membrana de intercambio protónico

La membrana de Intercambio Protónico Nafion 117 fue adquirida de la empresa Fuel Cell Store de Estados Unidos, por ser la más usada en el campo de las MFC y se procedió a su activación según indicaciones del fabricante (Product Bulletin-12, Fayetteville, USA). Se cortó la membrana según las dimensiones requeridas ($r = 4,4$ cm), seguidamente se procedió a hervir durante una hora (respectivamente), en agua destilada, peróxido de hidrógeno al 3%, ácido sulfúrico 0,5 M y agua destilada (3veces). Finalizado este procedimiento, se almacenó la membrana ya tratada en recipientes cerrados con agua destilada a temperatura ambiente, hasta su uso.

2.5. Diseño Y Construcción ML-MFC

El diseño de los sistemas ML-MFC se basó en el modelo unidireccional de Viridis implementado en un modelo tipo H de MFC. Se diseñó un lazo electrolítico como medio de intercambio de protones que reemplazaría al elemento PEM. Para la construcción de este elemento se tomaron los principios de la aceleración de caudal, producto de la variación de diámetros [87], al acelerar el caudal hacia la cámara catódica, se logró asegurar la uni-dirección el flujo, además de evitar la difusión de oxígeno hacia la cámara anódica. A este fenómeno se le conoce como efecto venturi, y se describe en la Figura 15. Para la construcción del lazo electrolítico, es importante utilizar materiales resistentes, que soporten los procesos de desinfección, sin afectar su integridad.

La ecuación de continuidad se escribe

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \text{ [87].}$$

Esta ecuación indica, por lo tanto, que la velocidad del fluido en el tramo de mayor diámetro, será menor a la velocidad en el tramo de menor diámetro. Se describe como:

Si $S_1 > S_2$, se concluye que $v_1 < v_2$ [87].

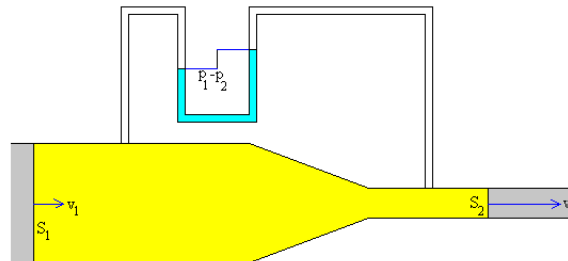


Figura 15. Representación esquemática de la aceleración de caudal.

2.6. Construcción MFC

Para la construcción de las Celdas MFC se elaboró un diseño a partir de un sistemas de dos cámaras presentado por Logan en 2007, además se propuso la utilización de la membrana Nafion 117, considerada ideal para este tipo de sistemas. Estos sistemas actuaron como los sistemas control frente a los sistemas ML-MFC, implementados con el diseño experimental del lazo electrolítico. Para poder comparar los sistemas, se construyeron tres repeticiones por tipo de sistema.

2.7. Pre-operación MFC y ML-MFC

Esterilización

Se utilizó Agua Residual Sintética modificada como sustrato, usando como fuente de carbono glucosa, a pesar de que el acetato es cada vez más utilizado como sustrato en las MFC, debido a su inercia hacia conversiones microbianas alternativos (fermentaciones y metanogénesis) a temperatura ambiente y de haber demostrado mayor producción eléctrica en comparación a otras fuentes carbono tales como la glucosa; aunque sin mucha diferencia [88]. Se decidió por la glucosa, debido a la imposibilidad de analizar la degradación de acetato en el medio.

El medio elaborado fue esterilizado con el uso de autoclave a 125 °C y 1,2 PSU, durante 15-20 minutos y su composición se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición Agua Residual Sintética [71].

Componentes	Función	Cantidades
Glucosa	Fuente de carbono	1,5 g/L
Bicarbonato de sodio	Liberación CO ₂ , ayuda con el proceso anaeróbico	750mg/L
Cloruro de amonio	Fuente de nitrógeno, formación aminoácidos y coenzimas.	27mg/L
Fosfato dipotásico	Los fosfatos se usan para la síntesis de los ácidos nucleicos y los fosfolípidos. El potasio interviene en la activación de enzimas para la síntesis de proteínas	9 mg/L
Fosfato de sodio monobásico	Los fosfatos se usan para la síntesis de los ácidos nucleicos y los fosfolípidos.	250 mg/L
Sulfato de magnesio	Sal en forma de anión, el ion magnesio es utilizado como cofactor en muchas reacciones	64mg/L
Peptona	Fuente de nitrógeno	500mg/L
Cloruro de hierro	El ion ferroso interviene como cofactor, además de formar parte en procesos de respiración	25 mg/L

Los sistemas completamente armados fueron esterilizados utilizando soluciones de hipoclorito de sodio al 0.5%, seguido por alcohol al 96%, y agua destilada; por último, fueron colocados en la cámara UV por espacio de 3 horas. De esta manera se aseguró la esterilidad de los sistemas [89]. Se tomaron como condiciones ideales para el crecimiento bacteriano, las condiciones ideales para el crecimiento de la bacteria electrogénica por excelencia: *Geobacter*, por lo tanto se mantuvo el medio con un pH de rango 6,2 – 7,4 [90].

Evolución de los Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos del Agua Residual Sintética fueron registrados con el Multiparámetro Hanna Multiparameter H9829, al inicio y al final de la experimentación; los parámetros se describen en la Tabla 2.

Además de los parámetros ya mencionados, se evaluó COD y azúcares reductores totales (ART). Se llama COD a la demanda química de oxígeno, por sus siglas en inglés, que corresponde a la cantidad de oxígeno consumido, equivalente a la materia orgánica susceptible a ser oxidada en condiciones operatorias definidas.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos evaluados con el Multiparámetro Hanna H9829

Parámetro	Unidades	Descripción
Oxígeno disuelto (DO)	Ppm	Cantidad de oxígeno disuelto en el agua, también actúa como indicador de contaminación, y es esencial en las reacciones de óxido-reducción
Conductividad	uS/cm	Propiedad que determina el paso de electricidad o calor ; en relación a TDS
Total de sólidos disueltos (TDS)	Ppm	Medida de todas las sustancias orgánicas e inorgánicas, de forma molecular, ionizada, o micro-granular

Aguas de desecho de origen industrial suelen tener valores de COD en el rango de 3000-5000 mg/L [94]; la disminución de COD en MFCs ha logrado valores bastantes impresionantes de 90.45% [74], 91% [85], 95 % [70], y similares; es por ello que para su evaluación se utilizó el método 8000 (USEPA, Reactor Digestion Method), con viales específicos para valores entre 200-1500 mg/L, y se realizó la lectura en un Colorímetro de mesa DR900, Hach. La evaluación de los azúcares reductores se realizó en el laboratorio de Control de Calidad de la Universidad Católica de Santa María localizado en el pabellón H 207. (Resultados se muestran en el Anexo5)

2.8. Comparación performance bioelectrogénica entre las celdas ML-MFC y MFC

Finalizado el proceso de esterilización se procedió a iniciar las pruebas en los diversos sistemas. Se realizó la inoculación 12 horas antes de encender las bombas e iniciar el flujo continuo; se midió el voltaje de manera automático con el software BenchLink DataLogger y los datos fueron guardados por el adquirente de 34972 *KeySight Technologies* cada 15s. El amperaje fue medido de forma manual utilizando una resistencia de 1Ω , por periodos de 3 horas, 3 veces al día; los datos faltantes fueron extrapolados. Los datos recolectados fueron utilizados para la obtención de la Potencia, Máxima Densidad de Potencia, Producción energética total; además de los parámetros registrados por el Multiparámetro Hanna H9829. Todos estos datos sirvieron como base para la comparación entre ambos tipos de sistemas. El hecho de que la generación de energía sea excesivamente sensitiva al tipo de membrana utilizada, tamaño de los electrodos, espacio entre electrodos, dificulta la comparación entre tipos de sistemas; es por ello que en esta investigación se intentó mantener la configuración de ambos tipos de sistemas iguales.

2.9. Conexión en serie: Aplicación energética

La utilización de la energía producida en los sistemas de manera directa, se considera improbable, a causa de la inestabilidad del sistema, se necesitaba una corriente continua de mínimo tres voltios para el correcto funcionamiento de los aparatos seleccionados, al no poder lograrse, se utilizaron baterías para la acumulación de la energía producida.

Con este fin se realizaron conexiones seriadas en los sistemas MFC (8, 9,10) y ML-MFC (7, 11,12), tales conexiones fueron realizadas con cable de cobre, y fueron unidas a baterías descargadas marca Opalux de 6V, descargadas a 3V, tal como se muestra en la Figura 16

Las baterías no fueron descargadas totalmente, debido a que los sistemas no alcanzaban al requerimiento energético necesario para iniciar la carga de la batería. Al tener una carga mayor en la batería que en los sistemas se vio por necesario instalar un diodo de germanio, evitando de esta manera que la energía fuera en dirección opuesta a la deseada [84].

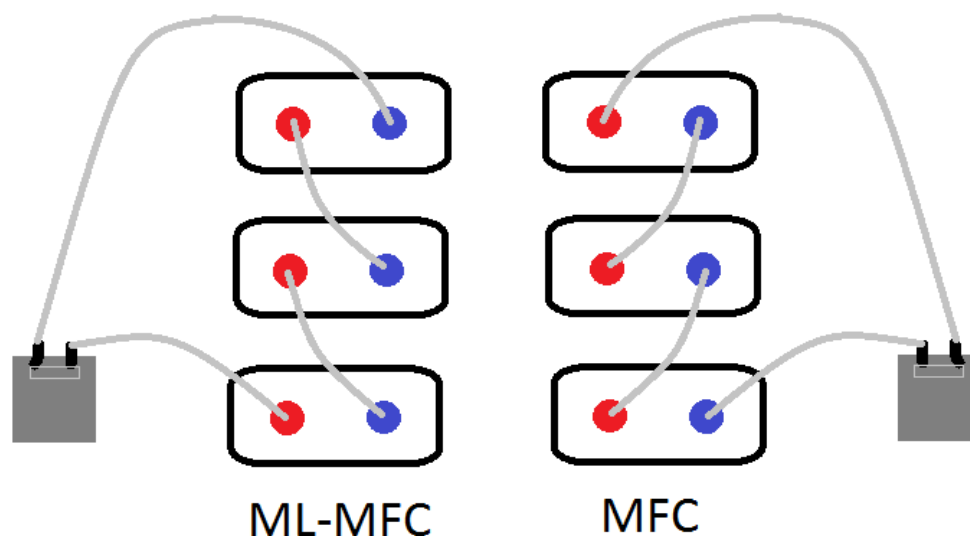


Figura 16. Diagrama conexiones seriadas en ML-MFC y MFC, para el almacenamiento de energía.

Una vez que las baterías llegaron a 6V y 4AH, es decir que las celdas almacenaban 3 V y 2AH, aproximadamente, se procedía a utilizar la energía acumulada en el funcionamiento de mini-ventiladores (Figura 17). Se utilizaron 4 baterías, dos por tipo de sistema, de esta manera no se desperdició energía; se midió la acumulación de energía en las baterías con el uso de un multímetro de campo Agilent U1272A.

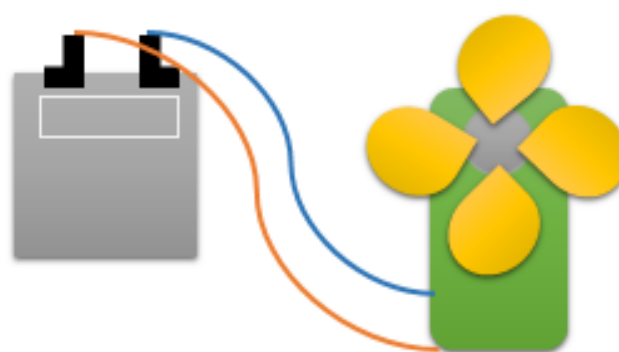


Figura 17. Diagrama ventilador portátil conectado a la batería, para la utilización de la energía.

2.10. Determinación de potencia

La potencia eléctrica es la cantidad de energía entregada en un periodo de tiempo. Es calculada a partir de los datos del diferencial de potencia y de la intensidad de corriente. Datos obtenidos fueron aplicados a la fórmula de corriente continua. Donde P, representa la potencia en watts; I es la intensidad de corriente y V el voltaje en voltios [84].

$$P = I * V$$

2.11. Determinación de densidad de potencia

La densidad de potencia (DP) es la potencia ejercida por cada m² de ánodo; es calculada dividiendo la potencia calculada entre el área total de ánodo y es expresada en Watts/m² [84].

$$A = 2\pi r * h$$

$$DP = \frac{P}{A}$$

2.12. Determinación energía total producida

La energía producida se calcula multiplicado el valor de potencia por en tiempo en segundos del funcionamiento del artefacto. Al no tener una potencia constante, se trabaja con cada valor de forma individual y se toma como energía total, a la suma de los valores [84].

$$P1 + P2 + P3 + \dots PN = PT$$

2.13. Análisis estadístico

Los datos fueron registrados en Excel, mientras que las pruebas de comparación se realizaron utilizando el software minitab al tratarse en general de la comparación de dos medias, se realizaron las pruebas de: Prueba T-student pareada para los datos iniciales vs finales y Prueba T-student para datos finales [96].



Capítulo III

3. Resultados

3.1. Recolección material biológico

La recolección del material biológico se realizó tal como se describe en la sección metodológica, y se realizó una caracterización con el multiparámetro Hanna Multiparameter H9829, con el fin de conocer las condiciones iniciales de los lodos activos recolectados, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados caracterización inicial lodos activos

Parámetros	Unidades	Resultados
Potencial hidrógeno	pH	7.22
Oxígeno disuelto (DO)	Ppm	1.75
Conductividad	uS/cm	386
Total de sólidos disueltos (TDS)	Ppm	193

Dichos resultados indican que los lodos recolectados, contaban con una carga orgánica menor a la esperada, de tan sólo 193 ppm de TDS se han reportados muestras con valores de hasta 3640 ppm de TDS, esta disminución en la carga orgánica se debe a la época de recolección, previa a la época de lluvia, por lo que el agua tratada se encontraba en tanques de almacenamiento en los cuales, ya se había dado un proceso de sedimentación, a pesar de la acumulación de los lodos en etapas posteriores al proceso de potabilización, la carga inicial baja, resultó en una orgánica menor; el valor de pH reportado se considera ideal para el crecimiento bacteriano, mientras que el bajo nivel de DO también resulta en un indicador de la presencia bacteriana.

3.2. Tratamiento membrana de intercambio protónico

Se realizó el tratamiento de la membrana Nafion 117 de acuerdo a indicaciones dadas por el fabricante para su activación. El procedimiento se menciona en la sección

metodológica, imágenes del procedimiento se muestran en la Figura 18; donde (A) Coratado de membrana a las dimensiones requeridas, (B) Aplicación tratamiento indicado por el fabricante, (C) almacenamiento en agua destilada tras tratamiento.

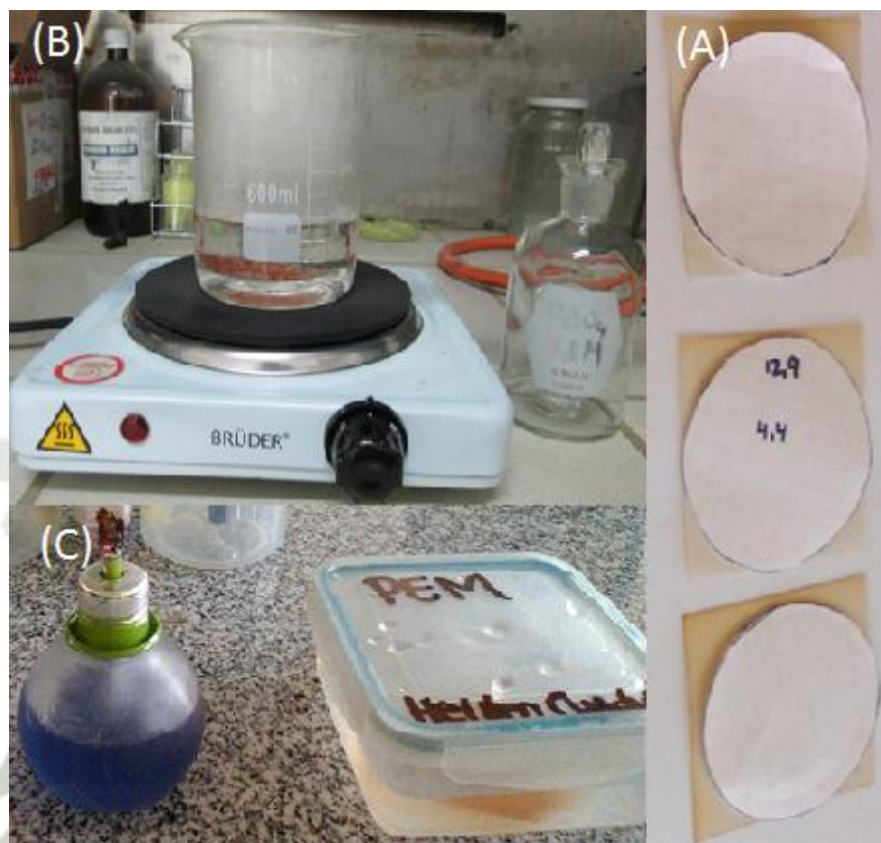


Figura 18. Tratamiento de Activación de membrana Nafion 117.

Con este tratamiento se aseguró que la membrana se encontrara en óptimas condiciones, alcanzando el diámetro ideal de porosidad, a la vez que se aseguró su desinfección

3.3. Diseño y construcción ML-MFC

Se construyeron tres sistemas de ML-MFC (7, 11,12), en forma de réplica, basándose en un diseño MFC tipo H, con la única variación que el medio de intercambio fue el lazo electrolítico, en lugar de la tradicional PEM o puente electrolítico. Los sistemas fueron construidos con recipientes plásticos herméticos, de la marca lock&lock. Recipientes circulares (9cm x 8cm), de 560 mL de tipo twist y

fueron utilizados como celdas principales, mientras que recipientes cuadrangulares (18cm x 12cm x 7cm) de 1,3L fueron utilizados como celdas de almacenamiento. El flujo continuo se logró con bombas sumergibles de la marca Boyu (GuadandDongBoyu GroupCO, China), de 150 L/h.

Al resultar en un flujo excesivo, se utilizaron válvulas médicas para regular el flujo a 1,3 mL/min (goteo) en ambos sistemas. El lazo electrolítico se construyó por separado y se probó en repetitivas ocasiones para asegurar la uni-dirección del flujo, el diseño del lazo se puede apreciar en la Figura 19. Este lazo es de 10 cm de largo, y cuenta con tres partes: a) Varilla de virio de 4 cm x 0,8 cm; b) válvula de tres vías; c) manguera de venoclisis 4 cm de largo. Más imágenes del diseño ideado se encuentran en el Anexo 6. En la Figura 20, se puede apreciar (a) Lazo electrolítico construido (b) lazo electrolítico instalado en las celdas.

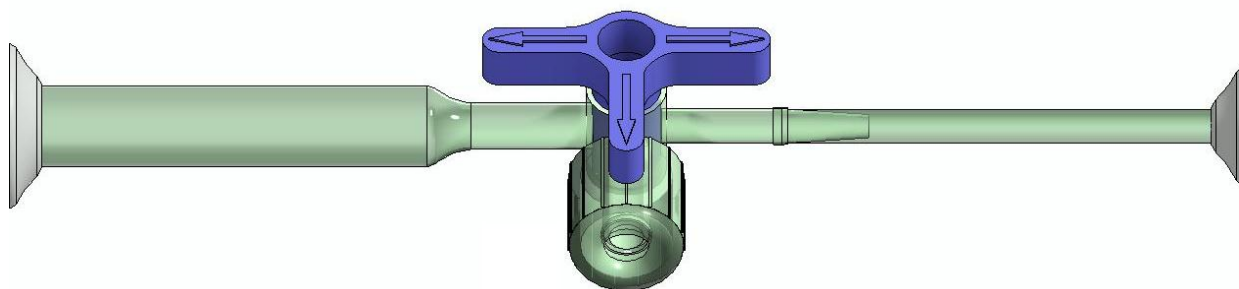


Figura 19. Diseño lazo electrolítico diseñado



Figura 20. Lazo electrolítico diseñado para ML-MFC.

Una vez confirmado el correcto funcionamiento del lazo electrolítico, se procedió al ensamblaje total de los sistemas, los sistemas fueron probados con líquidos de colores, verificando la ausencia de fugas.

La aireación en las cámaras catódicas fue lograda con el uso de bombas de aire de acuario (AP-208. VenusAqua, China). Se utilizaron tres bombas de aire para los seis sistemas. Al utilizar un volumen de 500 mL aproximadamente, la aireación de las bombas de acuario, también resultó excesiva; por lo que se elaboró un sistema de división de la oxigenación (Figura 22), de esta manera el flujo quedó reducido a 1,3ppm/s.

Se utilizaron electrodos de barras de grafito de 7.6 cm x 1.8 cm. La distancia de los electrodos inicial fue de 13 cm aprox. incrementado en 3 cm debido a la longitud requerida del lazo electrolítico. Todos los electrodos se mantuvieron en agua destilada al menos por 24 horas, previas a su funcionamiento [3].

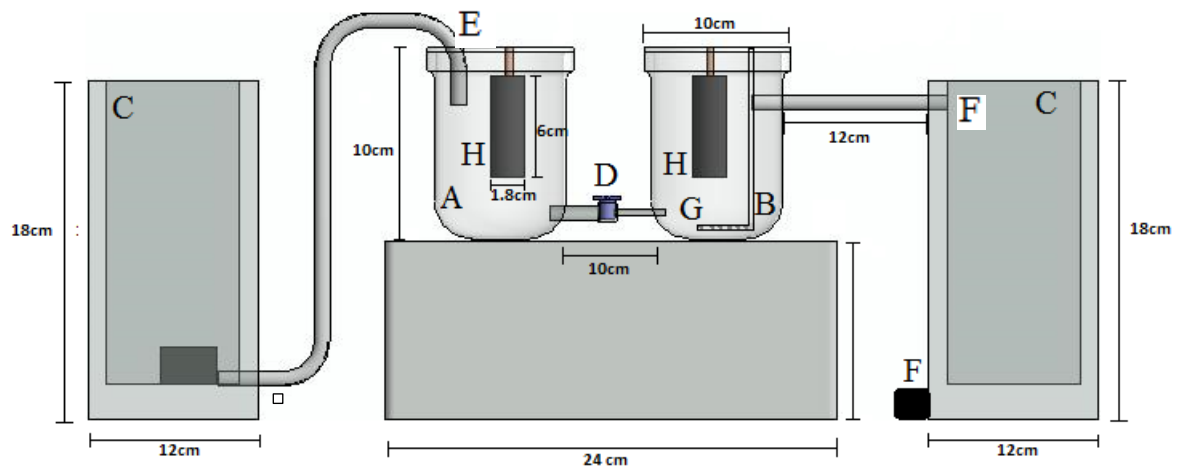


Figura 21. Configuración general ML-MFC.

El diseño se muestra en la Figura 21; en la cual se puede apreciar como cada cámara (A) y (B) se encuentran unidas por el lazo electrolítico(D), a la vez cada cámara se encuentra conectada en 1 punto a la cámara de almacenamiento (C), punto (E) y punto (K), el punto (E) es el punto de entrada de flujo, que proviene de la parte inferior de (C), mientras que el punto (K), es el punto de salida del efluente, proveniente de la cámara(B), el puerto(F) corresponde al puerto de recirculación. La configuración general también incluye electrodo (H) y sparger (G). En este diseño únicamente la cámara unida a la cámara anódica(A) contó con una bomba peristáltica que mantuvo un flujo constante en los sistemas. Además la cámara A se acondicionó con un puerto de inoculación (45°), entrada de flujo, electrodo, puerto de muestreo y

salida de gases; mientras que la cámara B cuenta con puerto de muestreo, sparger, electrodo, y salida de flujo (lateral). En el Anexo 7 se pueden apreciar más imágenes del diseño presentado.

Finalizadas las pruebas de funcionamiento, se procedió a los métodos de pre-operación, que dieron lugar a su ensamblaje final y funcionamiento; como se observa en la Figura 2.

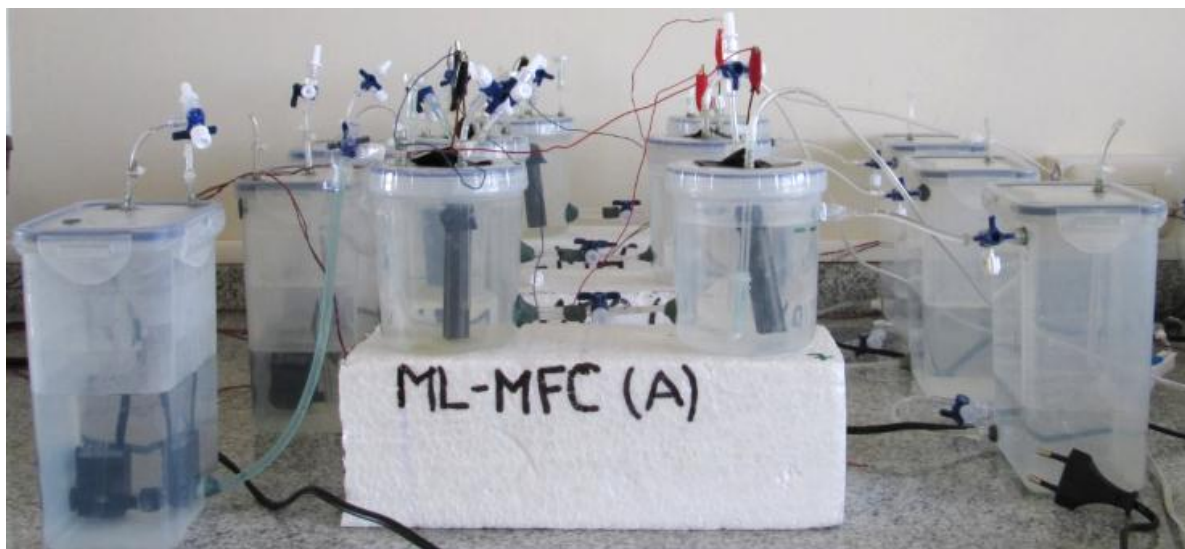


Figura 22. Sistemas tipo ML-MFC totalmente ensamblado y en funcionamiento

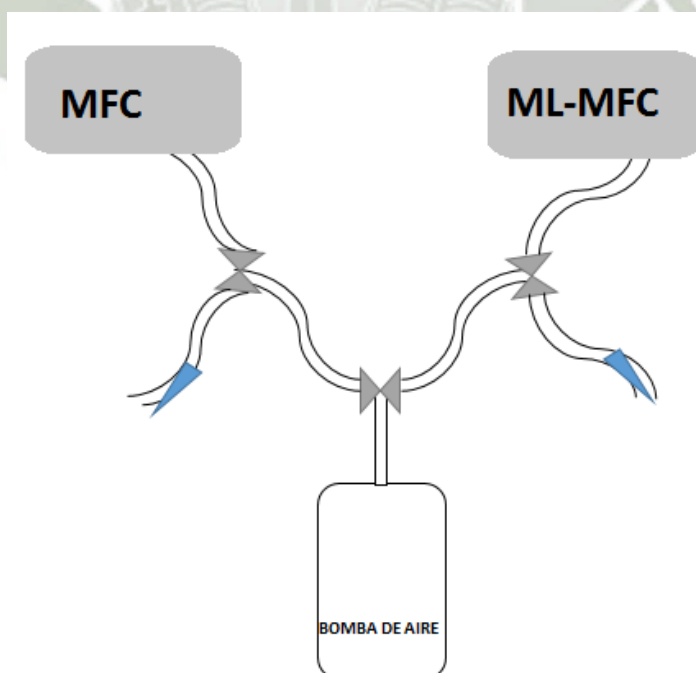


Figura 23. Sistema de aireación ideado para MFC y ML-MFC.

3.4. Construcción MFC

Los sistemas MFC fueron construidos basados en el diseño más común de MFC, el diseño tipo H. Se construyeron 3 sistemas MFC al igual que las ML-MFC, para la construcción de cada uno se utilizaron dos envases de 560mL como las celdas anódicas(A) y catódicas (B), ambas fueron unidas por una unión universal de 1 ¼ pulgadas de diámetro, es aquí donde se instaló la membrana de intercambio protónico. Se trató de mantener la máxima similitud entre ambos diseños MFC y ML-MFC, flujos de entrada, aireación, diámetros de los puertos, se mantuvieron iguales. El diseño se muestra en la Figura 24, donde (A) y (B) se encuentran unidas por PEM (D), cada cámara se encuentra conectada en dos puntos a la cámara de almacenamiento (C), punto (E) y punto (K), el punto (E) es el punto de entrada de flujo, que proviene de la parte inferior de (C), mientras que el punto (K), es el punto de recirculación proveniente de la cámara (A) o (B). La configuración general también incluye electrodo (H) y sparger (G). Además la cámara A se acondicionó de puerto de inoculación (45°), entrada de flujo, electrodo, puerto de muestreo, salida de gases y salida lateral de recirculación; mientras que la cámara B cuenta con puerto de entrada de flujo, muestreo, aireación, electrodo, y salida de flujo lateral de recirculación. Se pueden apreciar más imágenes de la configuración general del diseño en el Anexo 8.

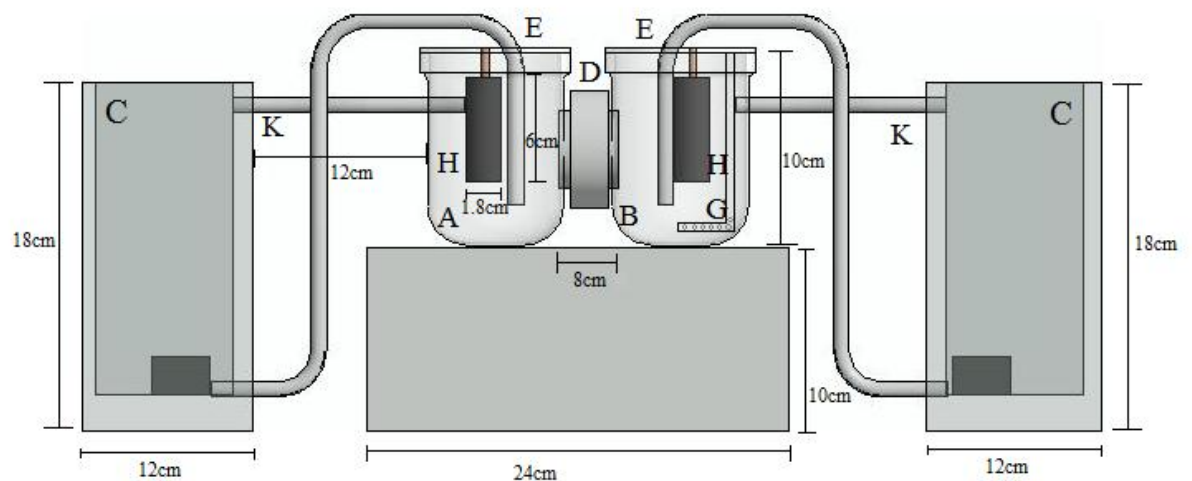


Figura 24. Configuración general MFC.

La construcción de los sistemas MFC se dio según las especificaciones expuestas en la parte metodológica y en forma de réplica, al igual que los sistemas tipo ML-

MFC. Una vez lograda la conexión entre ambas cámaras mediante la unión universal de 1 1/4 pulgada, se verificó la ausencia de fugas con agua de diversos colores, para facilitar la visualización de las fugas. Una gran diferencia entre ambos sistemas, que este sistema requirió la implementación de dos bombas, para la recirculación de ambas cámaras. Sin embargo se puede prescindir de la bomba de la segunda cámara dependiendo del tipo de solución que se utilice en esta cámara; es decir si necesita ser reemplazada o no. En este caso al utilizar agua, no se considera necesario el uso de una bomba, por lo que se mantuvo desconectada, pero fue implementada con el fin de tener el sistema listo para futuras investigaciones. Confirmada la ausencia de fugas se dio lugar a los procedimientos de pre-operación, y finalmente se realizó el ensamblaje e inició la etapa de experimentación. El sistema completamente armado y en funcionamiento se puede observar en la Figura 25.



Figura 25. Sistemas tipo MFC totalmente ensamblado y en funcionamiento

3.5. Pre-operación MFC y ML-MFC

Evolución parámetros fisicoquímicos

Previamente al funcionamiento de los sistemas se realizó una evaluación de los siguientes parámetros fisicoquímicos iniciales: Oxígeno disuelto, conductividad, sólidos totales disueltos, demanda química de oxígeno y azúcares reductores totales. Para la medición se utilizó el equipo multiparámetro Hanna Multiparameter H9829.

Para la monitorización se llamó a los sistemas ML-MFC 7, 11,12; mientras que los sistemas MFC fueron: 8, 9, 10.

Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto corresponde a la cantidad de oxígeno disponible para cualquier tipo de vida. En este caso el DO inicial fue de 4.65 ppm, para el final de la etapa experimental en el día 25, dichos valores descendieron en un 49% en promedio; lo cual indica la presencia y crecimiento de algunas bacterias aeróbicas, lo cual resulta común en cuanto al uso de inóculos bacterianos mixtos como reporta Ishii en 2008. No obstante, los valores iniciales de DO son menores a los ideales para la proliferación de vida por lo que se supone el crecimiento de microorganismos de naturaleza anaeróbica y anaeróbicos facultativos. A simple vista no se logra determinar una diferencia significativa entre ambos tipos de sistemas, cuyos valores oscilan entre 2.14 – 2.29, se muestran los valores en la Figura 26.

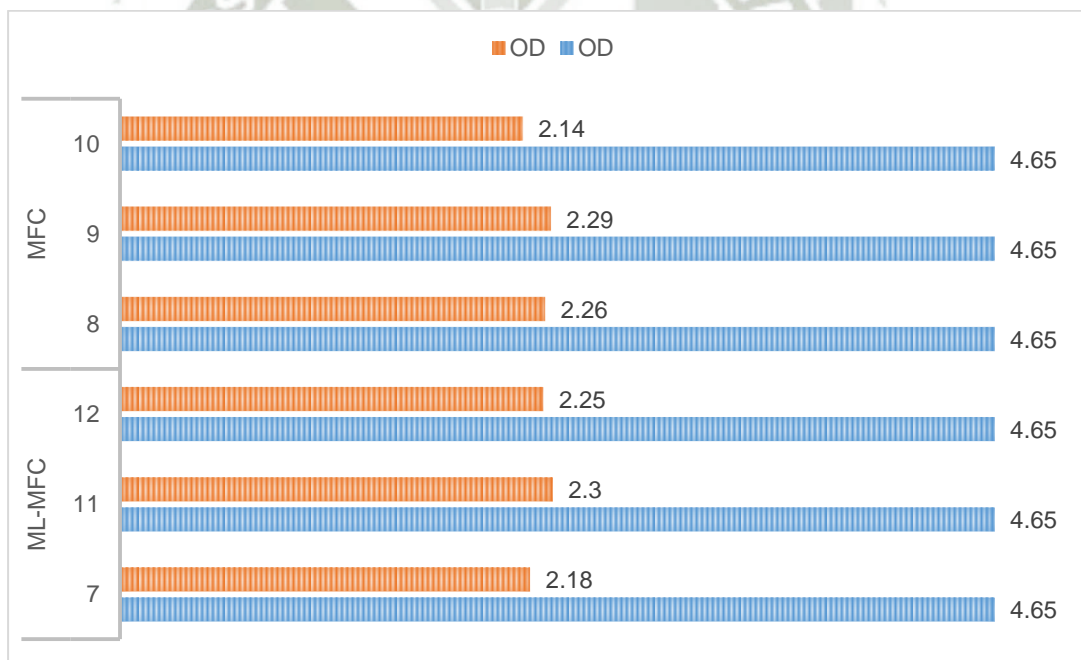


Figura 26. Resultados del análisis de Oxígeno disuelto, al inicio y al final de la experimentación

Se realizó análisis estadístico para demostrar la existencia o inexistencia de diferencia estadísticamente significativa para ambos sistemas. Se realizaron las pruebas de Intervalo de Confianza al 95%, T-student pareada, para los valores iniciales

y finales, y T-student para las medias finales; así como gráficos de intervalos (Figura 27) y valores individuales (Figura 28). La prueba IC y Prueba T pareada entre los valores iniciales y finales de DO en ppm, arrojaron un valor P de 0.000 al ser menor a 0.05, confirman una diferencia significativa entre los valores iniciales y finales. (Análisis completo se muestra en Anexo 4).

Se realizó una T-student de cc final DO (ppm), para ML – MFC vs cc final DO (ppm) ML-MFC vs MFC, se presupuso igualdad de varianzas para el análisis. El Método y la prueba T-student se muestra en la Tabla 4 y Tabla 5

Tabla 4. Método T-student para DO de ML-MFC y MFC

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Tabla 5. T-student para dos muestras DO

Sistema	N	Media	Desv. Est.	Error Est
MFC	3	2.2300	0.0794	0.046
ML-MFC	3	2.2433	0.0603	0.035

El análisis tipo T-student dio como valor P 0.828, al ser superior al valor de significancia, se asume que no existe diferencia significativa y se acepta la hipótesis nula. Probando que no hubo diferencia entre consumo de DO entre ambos tipos de sistemas ML-MFC y MFC.

La medición de DO, en la mayoría de investigaciones que implican la remoción del medio de intercambio PEM, se utiliza como indicador de la difusión de oxígeno hacia la cámara anódica; tal como Aldrovandi en 2009, Ghangrekar en 2008 y Jiang en 2010, en los casos de diseños sin membrana de una cámara, los valores de DO presentaron un gran aumento probando la difusión de oxígeno. El valor de DO también ha servido como indicador en algunos casos, de la presencia de microorganismos anaeróbicos o anaeróbicos facultativos, en el caso de utilizar inóculos microbianos mixtos, tales como Tardast en 2012, y Tamakloe en 2014.

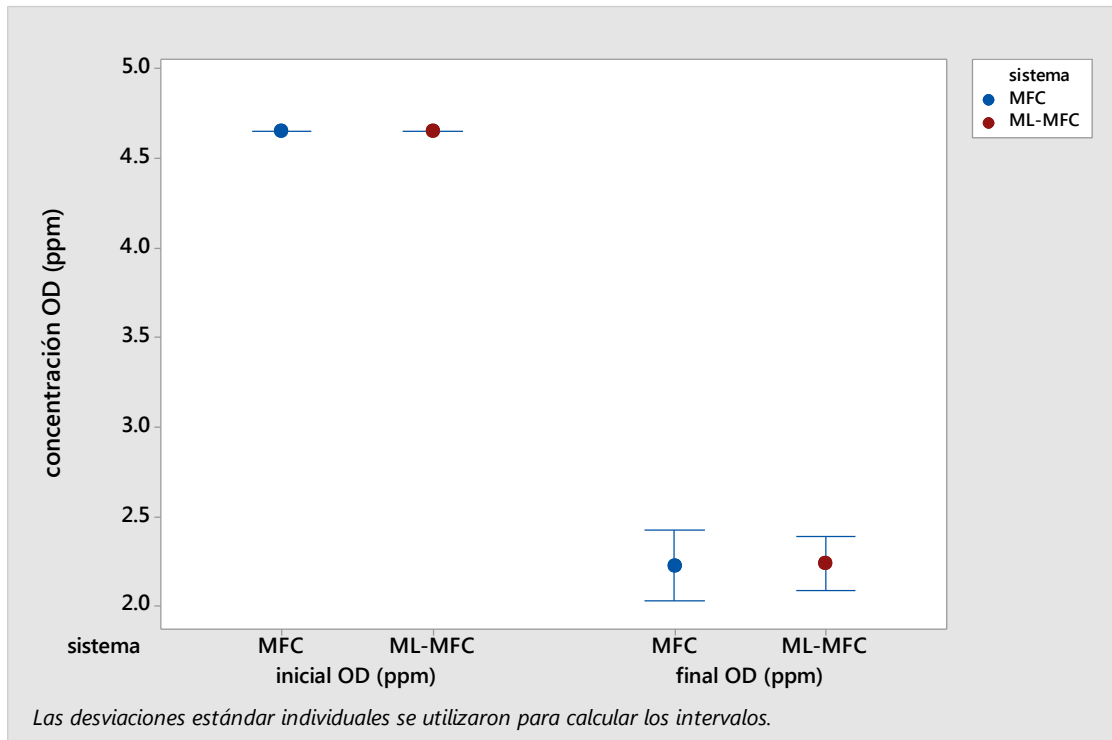


Figura 27. Intervalos de cc inicial DO (ppm) para ML-MFC vs MFC y cc final (ppm) para ML-MFC vs MFC

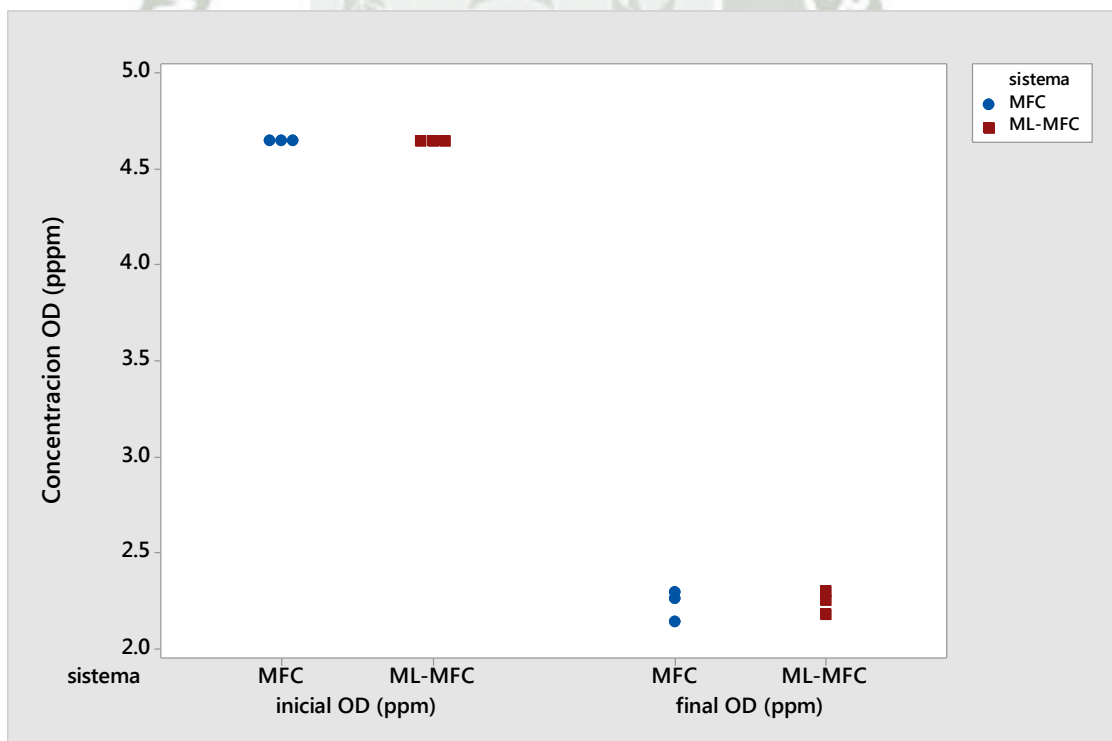


Figura 28. Valores individuales de cc inicial DO (ppm) para ML-MFC vs MFC y cc final DO (ppm) para ML-MFC vs MFC

Conductividad

La conductividad se expresa en uS/m, mide los electrolitos escasamente solubles se encuentra relacionada al movimiento molecular, y por lo tanto al total de sólidos disueltos [31]. Este parámetro permite conocer la facilidad con la cual se pueden transferir los electrones y protones, fundamental para el funcionamiento de una MFC.

La conductividad inicial registrada del ARS fue de 800 uS/cm, similar a los valores de agua de uso doméstico llegando a un máximo de 937 uS/cm en el sistema 12, tras 25 días de funcionamiento, similar a los valores obtenidos por Du Fangzhou en 2011 en un sistema tipo ML-MFC de dos cámaras con flujo electrolítico. Cabe añadir que los sistemas MFC alcanzaron un valor máximo de 934 uS/cm en el sistema 10, menor a los sistemas ML-MFC, pero sin mucha diferencia, en comparación; en la Figura 29, se puede observar la evolución de la conductividad de los sistemas tras 25 días de funcionamiento. En azul valores iniciales, en naranja, valores finales tras 25 días de experimentación.

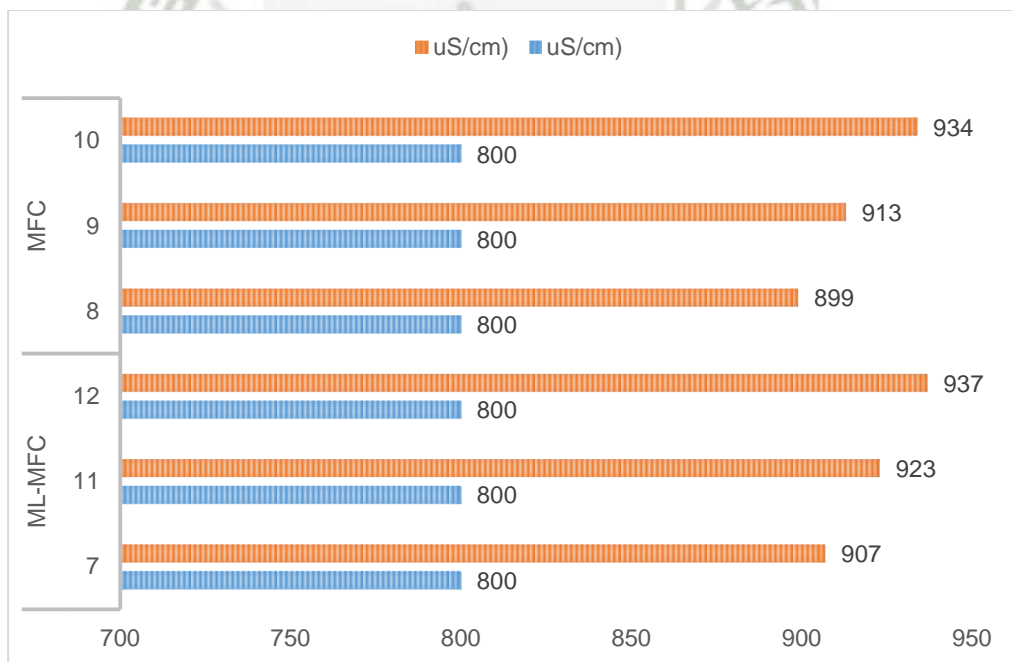


Figura 29. Resultados conductividad en uS/cm.

Se realizó análisis estadístico para demostrar la existencia o inexistencia de una diferencia estadísticamente significativa entre los sistemas ML-MFC y ML-MFC. Para

ello se realizaron las pruebas de Intervalo de Confianza al 95%, T-student pareada, para los valores iniciales y finales, y T-student para las medias finales; así como gráficos de intervalos (Figura 30) y valores individuales (Figura 31). La prueba IC y Prueba T pareada entre los valores iniciales y finales de conductividad en uS/cm, arrojaron un valor P de 0.000, al ser menor a 0.05, se confirma una diferencia significativa entre los valores iniciales y finales reportados en ambos tipos de sistemas ML-MFC y MFC. (Análisis completo se muestra en Anexo 4). Se realizó una T-student de cc inicial Conductividad (uS/cm), para ML – MFC vs MFC y cc final Conductividad (uS/cm) para ML-MFC vs MFC, se presupuso igualdad de varianzas para el análisis, el Método T-student se muestra en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Método T-student para Conductividad (uS/cm).

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Tabla 7. T-student para dos muestras Conductividad

Sistema	N	Media	Desv. Est.	Error Est
MFC	3	916.0	16.7	9.6
ML-MFC	3	922.3	15.0	8.7

El análisis de varianza dio como valor P 0.828, al ser superior al valor de significancia, se asume que no existe diferencia significativa y se acepta la hipótesis nula; es decir que no existe diferencia entre la conductividad lograda en los sistemas ML-MFC y los sistemas MFC.

La conductividad, describe la facilidad de transferencia de electricidad en un medio. Si bien se observó una diferencia entre la conductividad alcanzada entre los sistemas ML-MFC, y MFC; no fue considerada significativa. Al ser la conductividad de ambos sistemas iguales, se facilitó la evaluación de la eficacia del lazo electrolítico vs el elemento PEM.

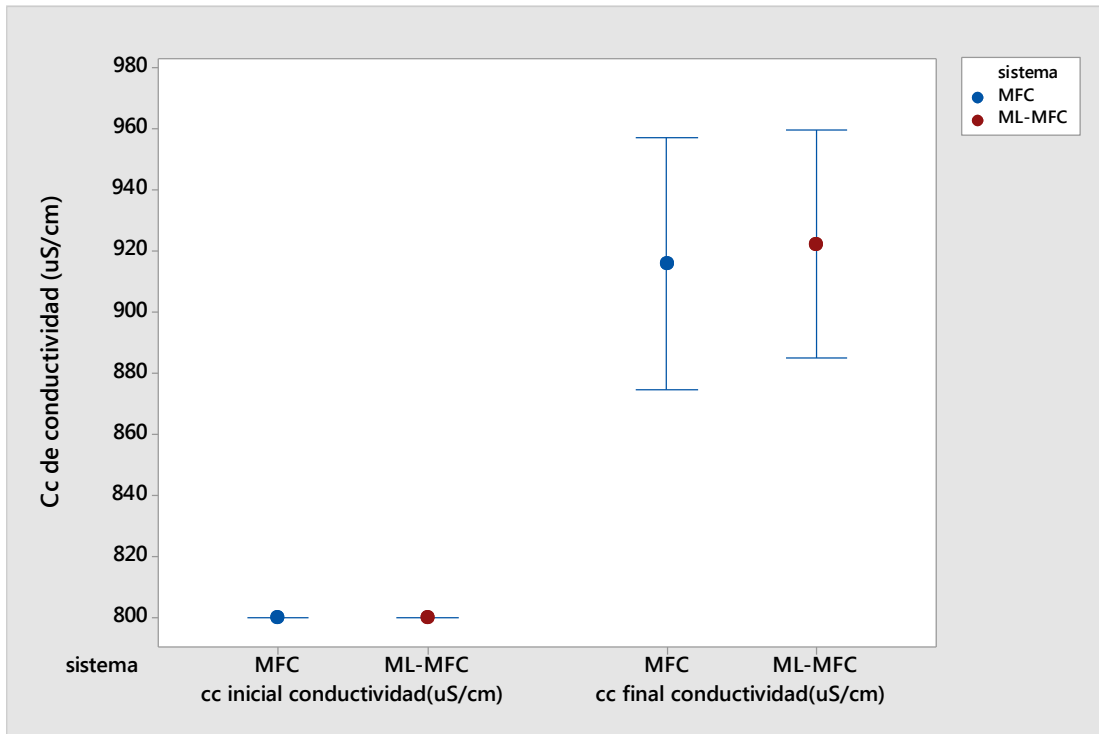


Figura 30. Intervalos de cc inicial de Conductividad (uS/cm) vs cc final Conductividad (uS/cm) para ML-MFC y MFC.

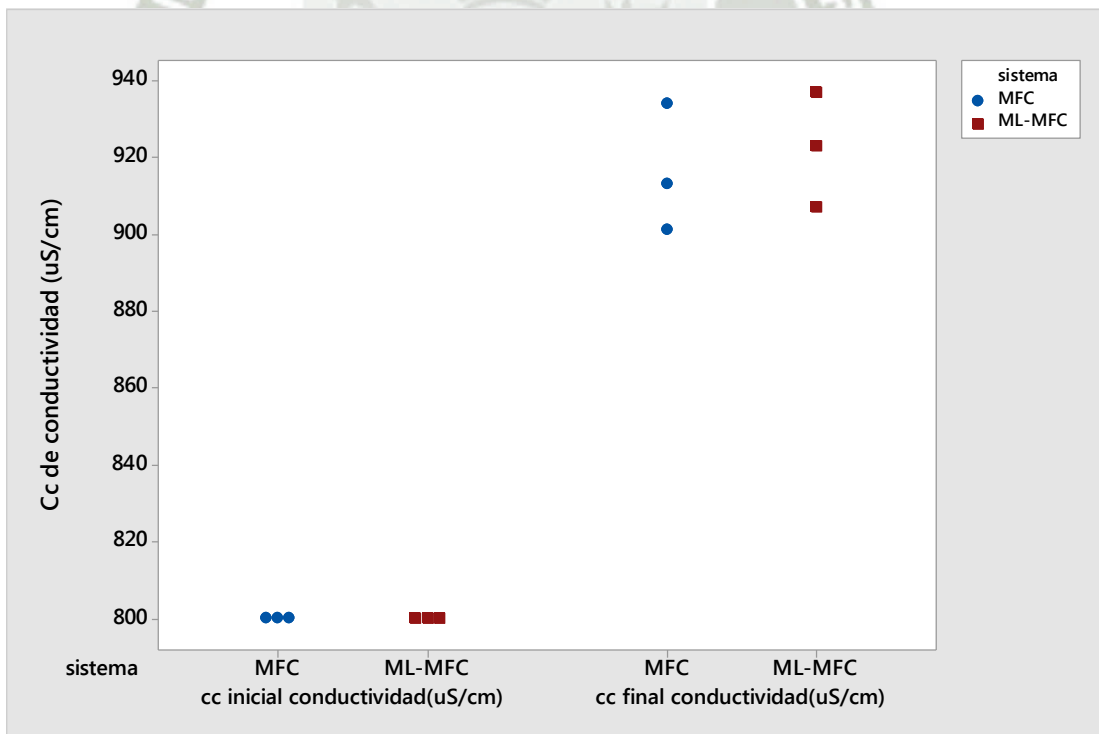


Figura 31. Valores individuales cc inicial de conductividad (uS/cm) vs final conductividad (uS/cm) para ML-MFC y MFC.

Total de Sólidos Disueltos

Los datos de sólidos disueltos difieren de los encontrados en sistemas que utilizan aguas residuales de origen natural en lugar de ARS. Este tipo de efluentes suelen tener valores de sólidos disueltos entre: 900 mg/L, 436 mg/L [29]; variando según el origen del efluente, dichos valores disminuyen tras el consumo de las macromoléculas por los microorganismos; en el caso del ARS, no hay macromoléculas presentes, por lo que el total de sólidos disueltos inicial llega a 401 ppm, que tras la etapa de experimentación alcanzó un valor máximo de 499 ppm, que resultaría en un claro indicador del crecimiento microbiano. En la Figura 32 se muestran los valores iniciales y finales de todos los sistemas evaluados.

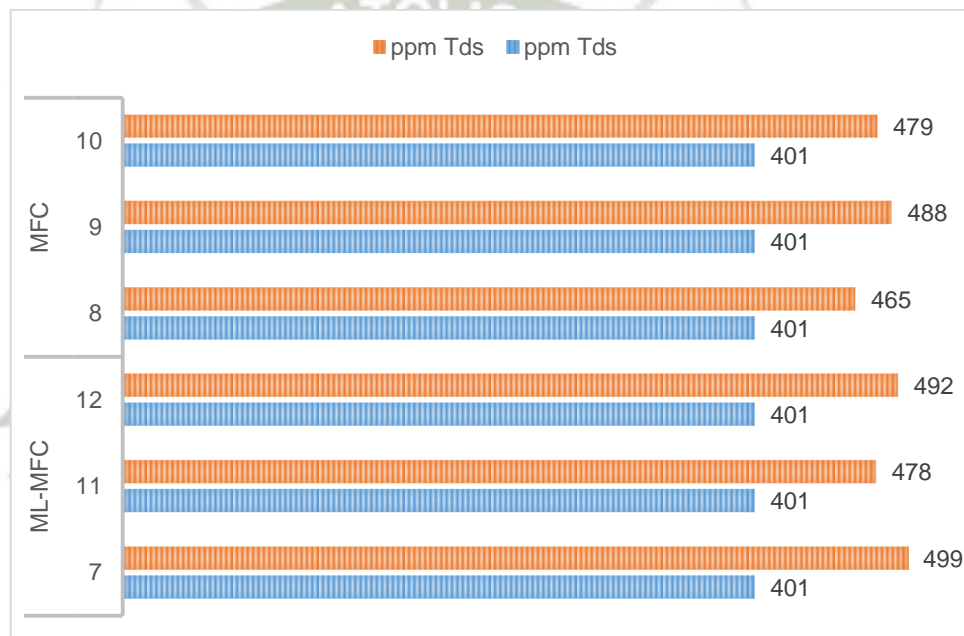


Figura 32. Gráfico de barras resultados análisis Total de sólidos disueltos en ppm

Se realizó análisis estadístico para demostrar la existencia o inexistencia de diferencia estadísticamente significativa. Se realizaron las pruebas de Intervalo de Confianza al 95%, T-student pareada, para los valores iniciales y finales, y T-student para las medias finales; así como gráficos de intervalos (Figura 33) y valores individuales (Figura 34). La prueba IC y Prueba T pareada entre los valores iniciales y finales de conductividad en uS/cm, arrojaron un valor P de 0.000 al ser menor a 0.05, confirman una diferencia significativa entre los valores iniciales y finales, con 95% de confianza (Análisis completo en Anexo 4).

Se realizó una T-student de cc inicial TDS (ppm), para ML – MFC vs MFC y cc final TDS (ppm) para ML-MFC vs MFC, se presupuso igualdad de varianzas, T-student se muestra en la Tabla 8 y en la Tabla 9.

Tabla 8. Método T-student para TDS (ppm)

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Tabla 9. T-student para las medias TDS

Sistema	N	Media	Desv. Est.	Error Est
MFC	3	477.3	11.6	6.7
ML-MFC	3	489.7	10.7	6.2

La prueba T-student dio como valor P 0.247, al ser superior al valor de significancia, se asume que no existe diferencia significativa y se acepta la hipótesis nula; es decir que no existe diferencia entre la cantidad de TDS lograda en los sistemas ML-MFC y los sistemas MFC.

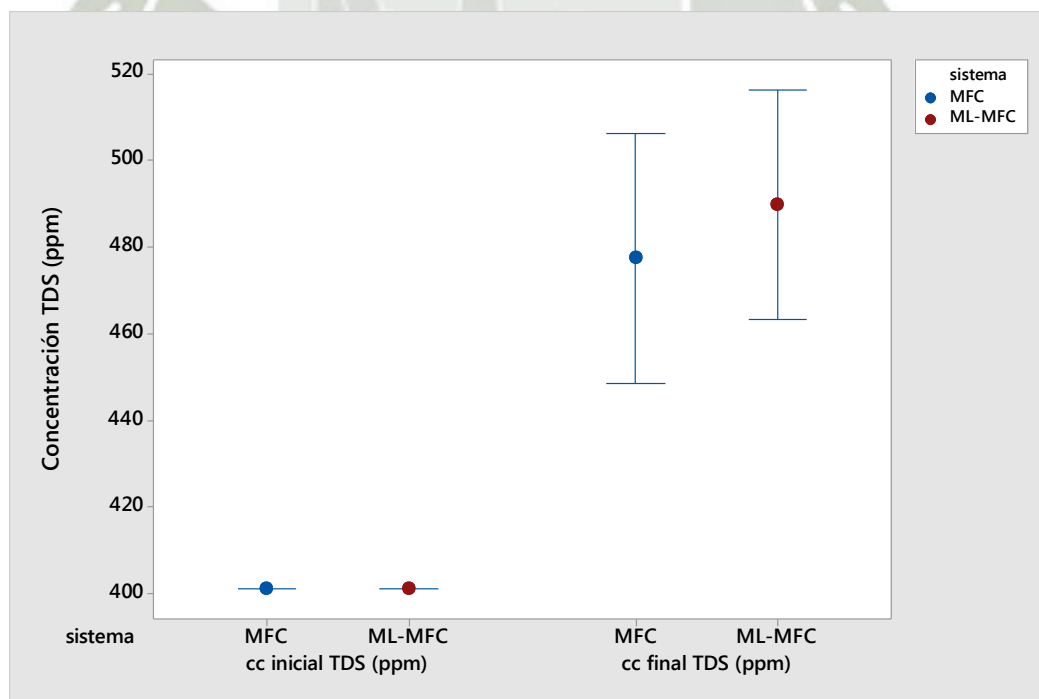


Figura 33. Intervalos de cc inicial TDS (ppm) de ML-MFC vs MFC y cc final TDS (ppm) de ML-MFC vs MFC

La cantidad de TDS se encuentra relacionada con el valor de conductividad, ya una mayor conductividad implica un mayor movimiento molecular. Un punto a resaltar, las investigaciones que utilizan ARS no suelen evaluar el parámetro TDS, como Aldrovani 2009 Ieropolus en 2005, pues presentan un aumento de TDS, a diferencia de las investigaciones que utilizan efluentes de desecho de diversos orígenes Pant 2010, Angenent 2004, Cheng 2010, esto debido a que la composición el ARS, se encuentra exenta de macromoléculas, por lo que el aumento en el nivel de TDS, en estos casos se asume como crecimiento microbiano

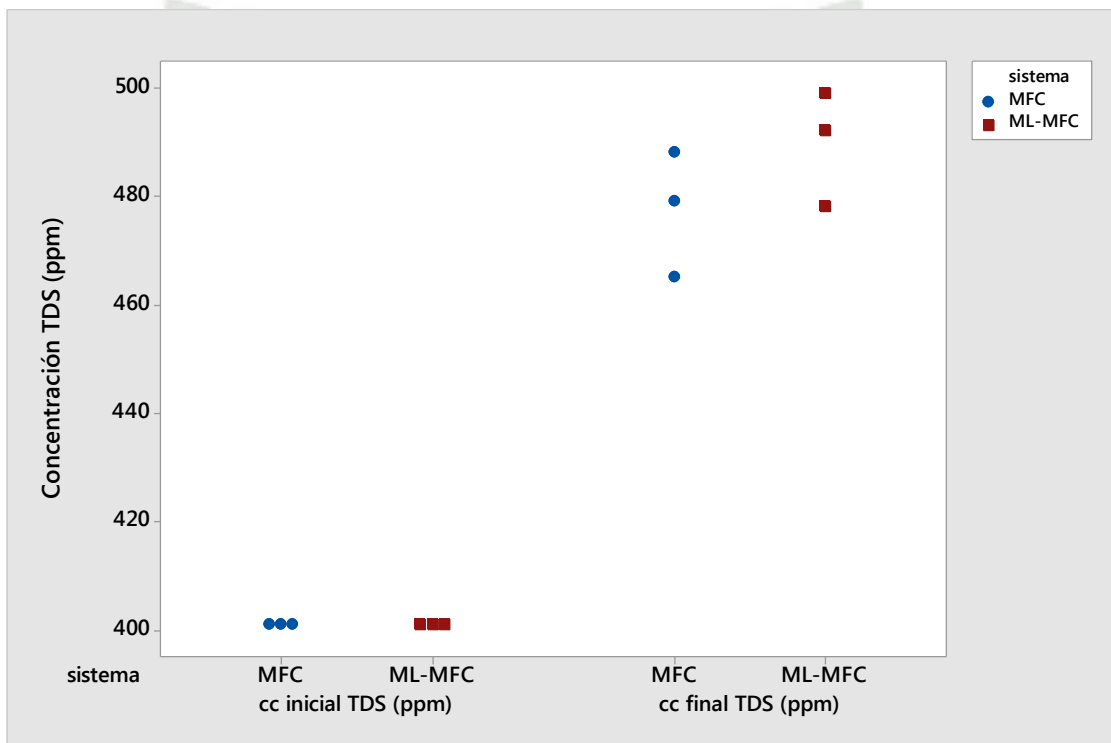


Figura 34. Valores individuales cc (inicial) TDS de ML-MFC vs MFC, y cc (final)TDS de ML-MFC vs MFC.

Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (CDO), como ya se mencionó, es un parámetro que permite conocer la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas; por lo tanto, resulta en un indicador de la concentración de la materia orgánica. Los valores de disminución de COD en sistemas MFC y ML-MFC, suelen ser bastante altos Aldrovandi en 2009 logró una disminución de 94% de COD en un sistema tipo ML-MFC, mientras que Ghangrekar en 2008 logró un valor de 82.7% en un sistema ML-

MFC uni-cámara; mientras que Tardast en 2012 logró 74% de disminución en el sistema utilizando el modelo del flujo unidireccional.

Los valores alcanzados de disminución por los sistemas elaborados, se aproximan a los alcanzados por Tardast en un diseño similar, logrando como máximo una disminución de 81.82%. En la Figura 35, se puede observar la evolución de los valores de COD a lo largo de la experimentación en porcentajes

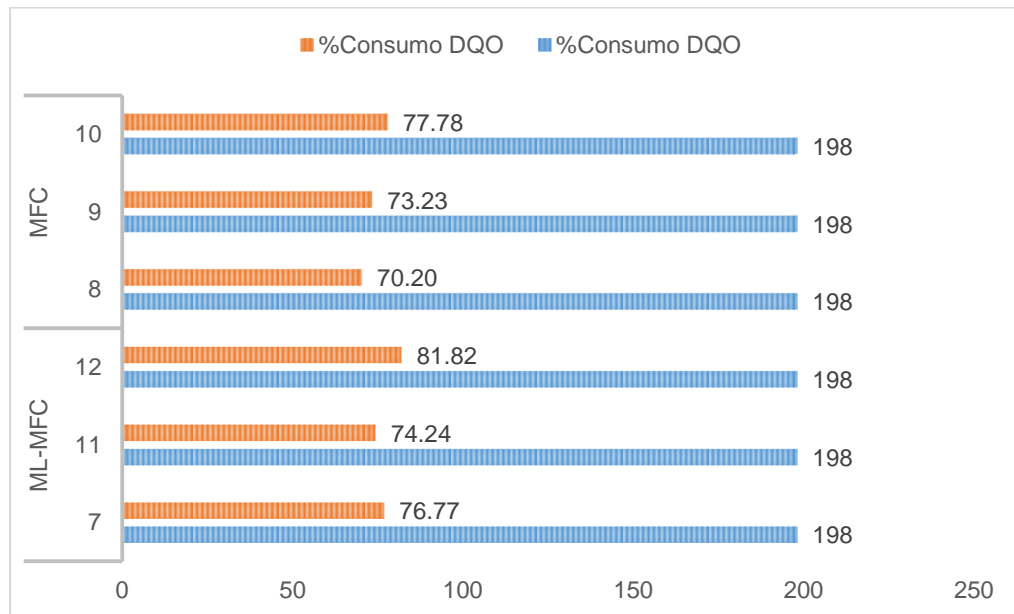


Figura 35. Resultado análisis % disminución de CDO

Se realizó análisis estadístico para demostrar la existencia o inexistencia de diferencia estadísticamente significativa entre los valores %de disminución entre ambos tipos de sistemas; para ello se realizaron las pruebas de Intervalo de Confianza al 95%, T-student pareada, para los valores iniciales y finales, y T-student para las medias finales; así como gráficos de intervalos inicial y final (Figura 36) y valores de porcentaje (Figura 37).

La prueba de IC y Prueba T pareada entre los valores iniciales y finales de CDO en %, arrojaron un valor P de 0.000 al ser menor a 0.05, confirman una diferencia significativa entre los valores iniciales y finales, con 95% de confianza (Análisis completo se muestra en Anexo 4). Se realizó T-student del porcentaje de consumo de COD, para ML – MFC vs MFC, se presupuso igualdad de varianzas, la T-student se muestra en la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10. Método T-student para % de disminución de CDO

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Tabla 11. T-student para las medias % disminución CDO

Sistema	N	Media	Desv. Est.	Error Est
MFC	3	73.74	3.81	2.2
ML-MFC	3	77.61	3.86	2.2

El valor P 0.284 fue arrojado por la T-student, al ser superior al valor de significancia, se asume que no existe diferencia significativa y se acepta la hipótesis nula; es decir que no existe diferencia entre la disminución de COD lograda en los sistemas ML-MFC y los sistemas MFC.

Este parámetro se considera vital para medir el funcionamiento de una MFC, en temas de eficacia, algunos autores han logrado valores que sobrepasan el 90% en disminución como Aldronvandi que alcanzó 91% de disminución utilizando agua sintética, cabe mencionar que este rango se dió en el trabajo de 14 meses, bajo flujo constante; lo que indicaría que la adaptación de los microorganismos en el medio, promueven un tratamiento de efluentes más eficiente [70]

En ARS, los valores suelen ser algo menores tal como reporta Moon en 2006, con una disminución de 70%. Los sistemas en la presente investigaciones lograron una media máxima de disminución de 77.61% con DE=3.86 (ML-MFC) y 73.74% con DE =3.81 (MFC); nuevamente no se encontró diferencia significativa entre los sistemas con o sin membrana; sin embargo, los sistemas ML-MFC, también lograron disminución de CDO en la cámara anódica, al no tener comparación en los sistemas MFC, estos datos no se tomaron en cuenta

Degradación azúcares reductores

Se consideró imprescindible calcular la cantidad de glucosa al inicio y al final de la oxidación, debido a que la glucosa es agregada al medio como fuente de carbono, tal como se describe en la Tabla 1.

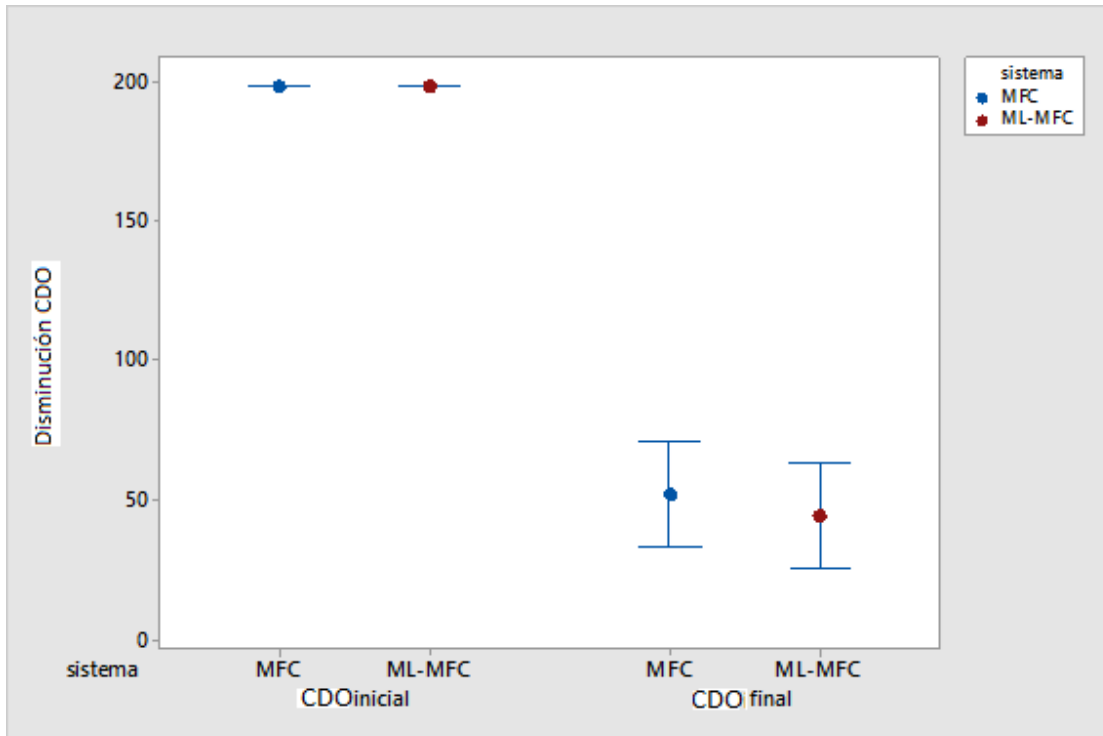


Figura 36. Intervalos de COD inicial de MFC y ML-MFC vs COD final de MFC y ML-MFC

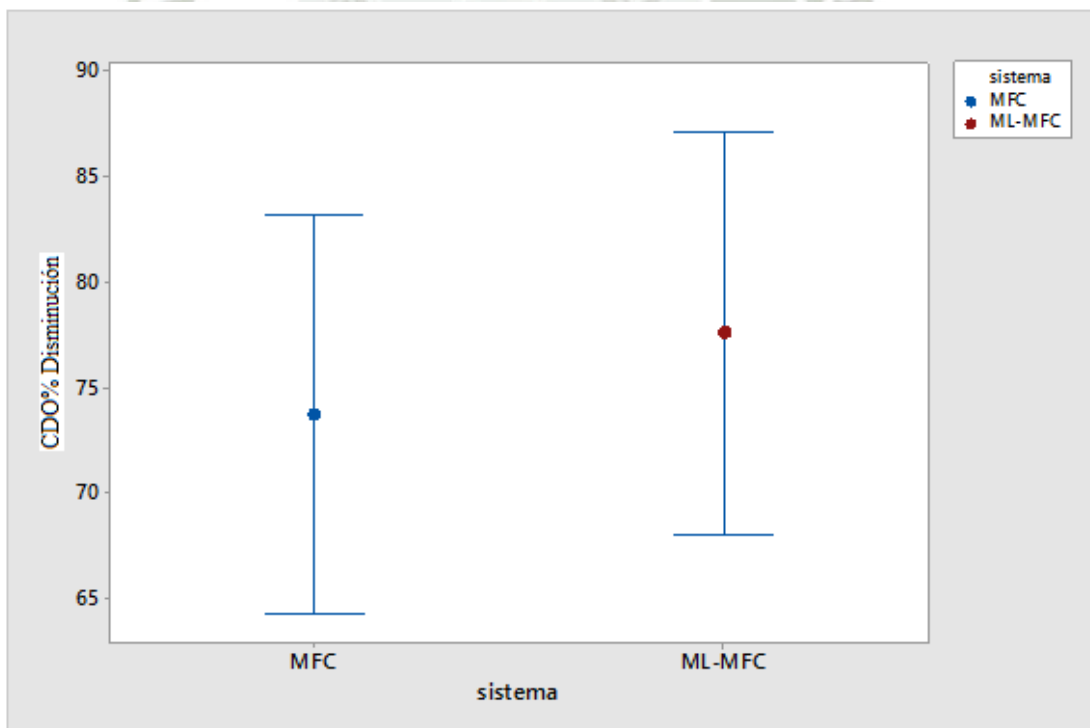


Figura 37. Intervalos de % disminución de COD de ML-MFC vs MFC

Al ser la glucosa un carbohidrato simple, se encuentra dentro de la lista de azúcares reductores, al ser el único carbohidrato presente en el ARS, se realizó el análisis anulando las probabilidades de confusión en los resultados. Los análisis se realizaron en el laboratorio de control de calidad de la UCSM. Los resultados se muestran en la Tabla 12 y en el Anexo 4.

Tabla 12. Resultados del análisis de azúcares reductores totales

Sistemas	Glucosa g/L
Inicial	1,5
7 f	<0,1
8 f	<0,1
9 f	<0,1
10 f	<0,1
11 f	<0,1
12 f	<0,1

Se puede observar que todos los sistemas iniciaron con 1,5 g/L de glucosa; y finalizaron con valores menores a 0,1 g/L; lo que sirve como indicador del consumo hecho por los microorganismos para la reducción de glucosa, y posterior producción energética; conjunto a la pruebas de TDS, que se tomaron en esta investigación como factor de crecimiento bacteriano, se puede confirmar que los microorganismos lograron adaptarse de manera exitosa al sustrato utilizado, oxidando la fuente de carbono. La gran mayoría de investigadores que utilizan fuentes de carbono agregadas a los sustratos utilizados, registran una remoción de hasta el 100% de dicha fuente [36, 42, 48].

El consumo de azúcares reductores, que en este caso sería glucosa resulta en la prueba de la degradación de materia orgánica por parte de los microorganismos, la glucosa es comúnmente usada como fuente de carbono en las investigaciones que utilizan agua residual sintética Aldrovandi (2009), Moon (2006) e incluso como enriquecedor en verdaderos efluentes de desecho [29]. El consumo de ART fue igual en ambos tipos de sistemas, lo que indica el cambio del diseño no afectó en sentido, positivo o negativo, la actividad microbiana.

3.6. Comparación performance bioelectrogénica entre las celdas ML-MFC y MFC

Para evaluar la diferencia entre ambos tipos de sistemas, se utilizaron diversos parámetros: DO, ART, Conductividad, TDS, CDO; además de la producción total en Joules y máxima densidad de potencia. La diferencia de potencial fue registrada cada 15 segundos por el Adquisitor de Datos, Keysight Technologies 3472A LX1 Data Acquisition/Switch unit.

En la Figura 38 se muestran los sistemas ML-MFC (7,11,12) y MFC (8,9,10), en funcionamiento y monitorización, mientras que en la Figura 39 se muestra el comportamiento de todos los sistemas durante los 25 días de funcionamiento, los datos se muestran cada 16 horas, para una mejor apreciación. En esta figura se puede rescatar comportamiento inestable en todas las celdas, similar al comportamiento reportado por Aldrovandi en 2009 y de Khan en 2012.

Este comportamiento se considera normal en este tipo de celdas, más aún en las celdas tipo ML-MFC, ya que la ausencia de membrana provoca algunas fallas en la uni-dirección del flujo, que da lugar a valores negativos de diferencial, estas irregularidades se reportaron durante todo el funcionamiento en ambos tipos de celdas.



Figura 38. Sistemas MFC y ML-MFC en funcionamiento y monitorización.

La monitorización fue detenida al no observar valores significativos en todas las celdas; el sistema de Aldrovandi en 2009, se mantuvo en funcionamiento por aproximadamente un año, con continua alimentación al sistema con sustrato nuevo, sin observar una paralización en la producción energética. Al reutilizar el sustrato en los

sistemas, se llegó a un punto de paralización en la producción. La intensidad de corriente fue registrada de manera manual y fue utilizado para conocer el total de la energía generada; al ser los sistemas de circuito cerrado, el mecanismo de recirculación permitió que el funcionamiento se extendiera a 25 días, mucho mayor al tiempo de funcionamiento de Rotara en 2014, de sólo 5 días de funcionamiento, los valores máximos de diferencia de potencial se muestran en la Tabla 13. Donde el mayor voltaje registrado corresponde al sistema 11 del tipo ML-MFC que registró 1.22 voltios, mientras que el de menor valor registrado fue el del sistema 7 también del tipo ML-MFC registrando 1.033; en todos los casos los valores máximos superan al voltio, resultando en algo excepcional ya que supera los valores reportados por los modelos anteriormente reportados por Du en 2011 de 160mV, y Tardast en 2012 de 490mv, ambos sin el elemento PEM.

A pesar de los extraordinarios registros de máximo voltaje, no se consideran estos valores como representativos del comportamiento de las celdas, debido a que se trataron de datos únicos, que no se mantuvieron de manera estable a lo largo de la etapa experimental.

Tabla 13. Máximo voltaje registrado obtenido por sistema

Tipo de Sistema	Sistema N°	Máximo Voltaje, V
ML-MFC	7	1.0333458
	11	1.2155714
	12	1.2052162
MFC	8	1.1867392
	9	1.1971701
	10	1.2146382

3.7. Conexión en serie: Aplicación energética

La acumulación de energía se realizó en dos baterías marca Opalux, tal como se indica en la parte metodológica. Realizada la conexión le tomó 9 días a los sistemas ML-MFC (a), llegar de 3.101V a 6.222. . La evolución de la acumulación de la energía se muestra en la Figura 40.

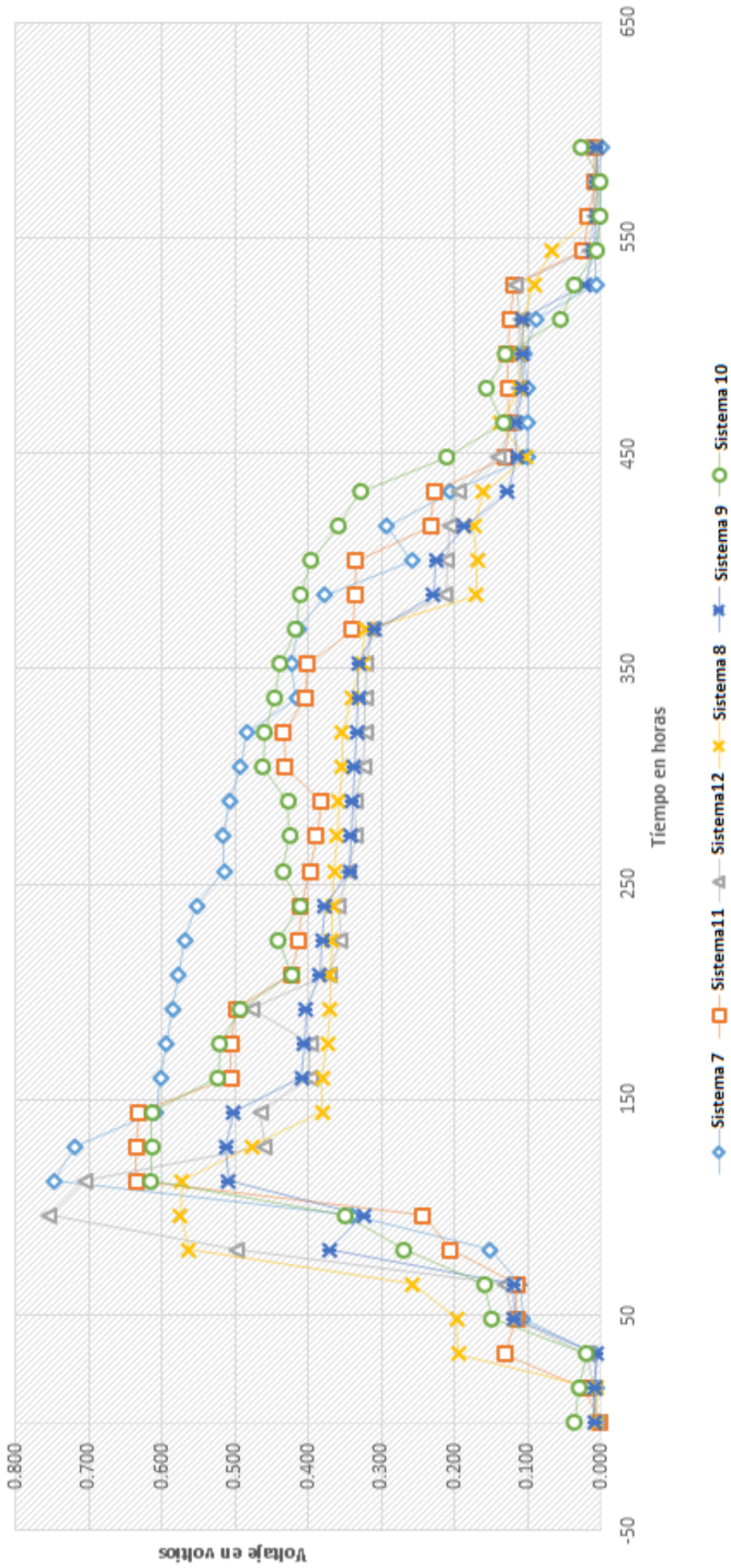


Figura 39. Resultados diferencia de potencial

Donde (a) Derecha en naranja, sistema ML-MFC, (b) Izquierda en verde, sistemas MFC; así mismo en la Figura 41, se muestra el mini-ventilador en funcionamiento con la energía producida y acumulada.

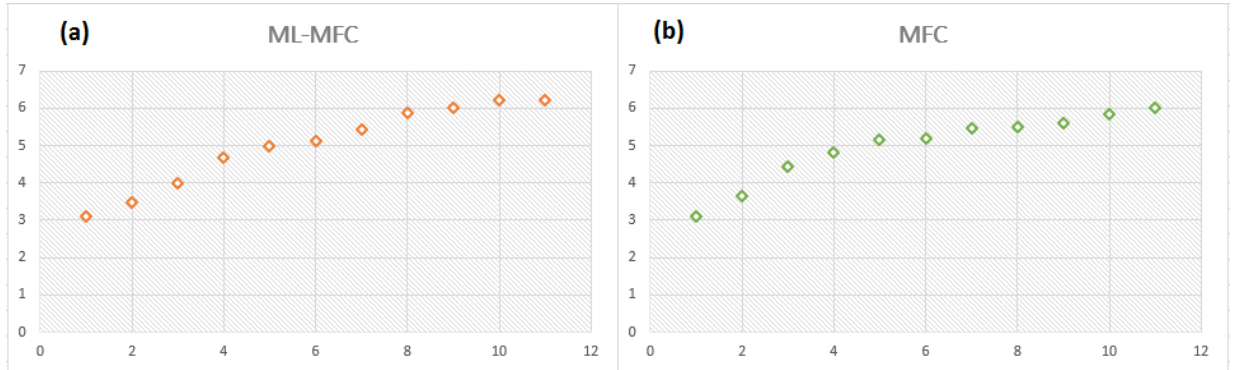


Figura 40. Evolución recolección energética en las baterías de almacenamiento.

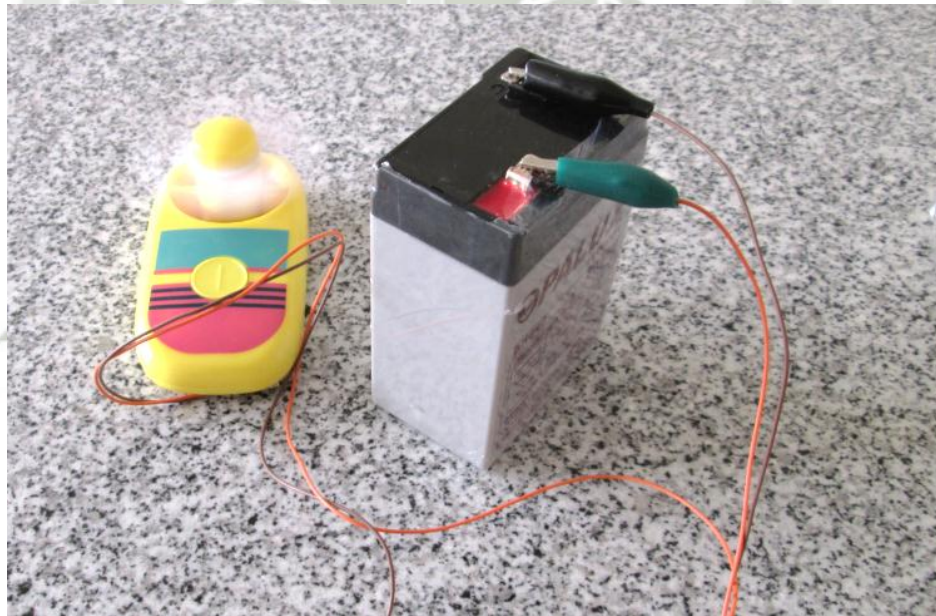


Figura 41. Mini-ventilador portátil en funcionamiento con la energía producida y almacenada.

La acumulación de energía en las baterías se logró de manera satisfactoria, siendo el primer sistema en alcanzar la carga total, del tipo ML-MFC; esto debido, a que como se pudo observar en lo resultados, los sistemas ML-MFC, tuvieron un desempeño superior (siendo no significativo), a los sistemas MFC. Sin embargo, esta diferencia no significativa en suma, resultó en una acumulación superior, en términos de tiempo.

3.8. Determinación de potencia

La potencia expresada en Watts determina la cantidad de energía entregada en un determinado periodo de tiempo. Hallar la potencia de los sistemas se considera un paso para hallar la densidad potencia, valor de mayor interés, que relaciona la cantidad de energía producida con el área del ánodo y utilizado por la gran mayoría de investigadores como indicador del desempeño de las celdas [31]

3.9. Determinación densidad de potencia (DP)

La densidad de potencia (DP) es un parámetro que describe el desempeño general de las celdas en relación a la superficie del ánodo de los mismos sistemas, lugar donde ocurren las reacciones. El máximo valor de DP de los sistemas fue de 204.23634 mW/m², y fue registrado en el sistema 12 del tipo ML-MFC, valores bastantes superiores a los 80.128 mW/m² alcanzados por Tardast en 2012 en el mismo tipo de sistema. Por otro lado, los sistemas tipo MFC alcanzaron un valor máximo de DP fue de 201.064925 aún por debajo de los valores registrados por Ishii en 2008, alcanzando 461 mW/m², uno de los valores más altos registrados, que fue obtenido un sistema de MFC con cátodo de aire. Los valores obtenidos por todos los sistemas se muestran el Tabla 14.

Tabla 14. Máxima densidad de Potencia obtenida en los sistemas.

	Sistemas	Densidad de Potencia (mW/m ²)
ML-MFC	7	194.7222095
	11	201.699227
	12	204.236324
MFC	8	190.9165637
	9	200.1135411
	10	201.0649525

Se realizó análisis estadístico para demostrar la existencia o inexistencia de diferencia estadísticamente significativa, para ello realizó una T-student; así como gráficos de intervalos de DP (Figura 42)

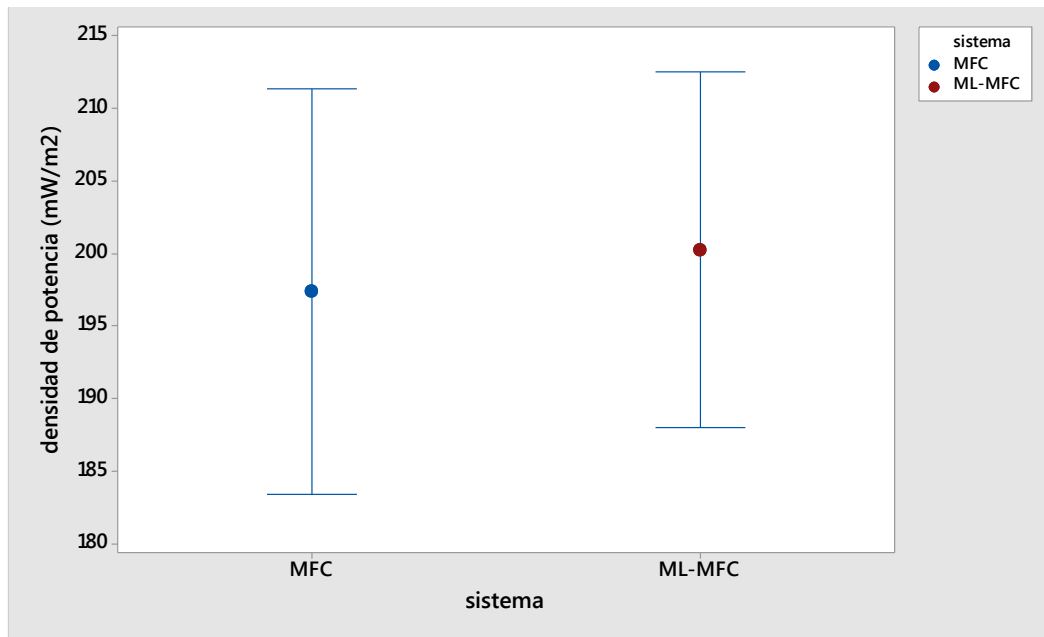


Figura 42. Intervalos de Máxima Densidad de Potencia (mW/m²) de ML-MFC vs MFC

Se realizó una T-student, para ello se presupuso igualdad de varianzas. El método y la prueba T-student se muestra en la Tabla 15 y Tabla 16

Tabla 15 .Método T-student para máxima densidad de potencia

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Tabla 16. T-student para medias de Máxima Densidad de Potencia

Sistema	N	Media	Desv. Est.	Error Est.
MFC	3	197.37	5.60	3.2
ML-MFC	3	200.22	4.93	2.8

La prueba T-student dio como valor P 0.544, al ser superior al valor de significancia, se asume que no existe diferencia significativa entre ambos tipos de sistemas y se acepta la hipótesis nula. De esta manera se demostró que no existe

diferencia entre el máximo de densidad de potencia en mW/m^2 alcanzado por los sistemas M-MFC y los sistemas MFC.

La densidad de potencia depende de la potencia alcanzada por los sistemas en relación al área del electrodo utilizado, sirviendo como indicador de la cantidad de energía producida por m^2 de electrodo; similares a los valores reportados por Moon en 2006, en un sistema con PEM y agua artificial. Estos valores se encuentran relacionados al tipo de electrodos utilizados en las investigaciones. Al utilizar electrodos de barras de grafito, se tiene un área menor a la obtenida al utilizar papel carbón o tela carbón como lo hicieron los investigadores anteriormente mencionados; esta diferencia en el área influye en la diferencia en la densidad de potencia final; sin embargo, no resulta en un factor decisivo, por lo que es utilizado por los investigadores como una referencia del desempeño de los sistemas MFC.

3.10. Determinación de energía total producida

La energía total producida expresada en Joules se logró calcular mediante la multiplicación de los datos de tensión obtenidos mediante monitorización, y los datos de intensidad. La determinación de la producción energética total, simplificó la comparación entre sistemas, la máxima producción fue alcanzada por el sistema 12, cada sistema presentó una producción total distinta, se utilizó análisis estadístico para demostrar la existencia de una diferencia significativa entre ambos tipos de sistemas, los que usaron o no PEM. La producción energética total en Joules de cada sistema se muestra en la Figura 43 y en la Tabla 17.

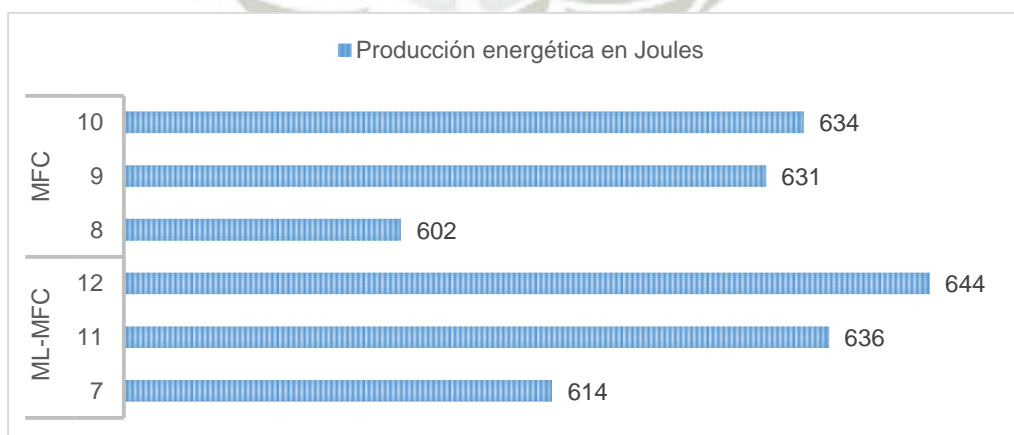


Figura 43. Gráfico de barras Producción energética en Joules

El sistema 8 del tipo MFC, registró la menor producción energética de todos los sistemas, si bien la mayoría de los sistemas tuvieron una producción energética menor a los ML-MFC, se especula que los sistemas 7 y 8 tuvieron un menor desempeño debido a su exposición a la luz solar; se requiere de mayores investigaciones para aclarar este hecho [95]

Tabla 17. Producción energética total por sistemas, expresado en Joules

	Sistema	Joules Producidos
ML-MFC	Sistema 7	614
	Sistema11	636
	Sistema12	644
MFC	Sistema 8	602
	Sistema 9	631
	Sistema10	634

Se realizó análisis estadístico para demostrar la existencia o inexistencia de diferencia estadísticamente significativa para ello, se realizó una T-student de producción energética en Joules para ML – MFC vs MFC; se presupuso igualdad de varianzas, el método y prueba T-student se muestra en Tabla 18 y Tabla 19; además de gráficos de intervalos (Figura 44)

Tabla 18. T-student para Producción energética total en Joules

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Tabla 19. T-student para producción energética total

Sistema	N	Media	Desv. Est.	Error Est.
MFC	3	622.3	17.7	10
ML-MFC	3	631.3	15.5	9.0

El análisis T-student dió como valor P 0.544, al ser superior al valor de significancia, se asume que no existe diferencia significativa y se acepta la hipótesis nula. Probando que no hubo diferencia entre la cantidad total de energía producida en Joules alcanzado por los sistemas M-MFC y los sistemas MFC.

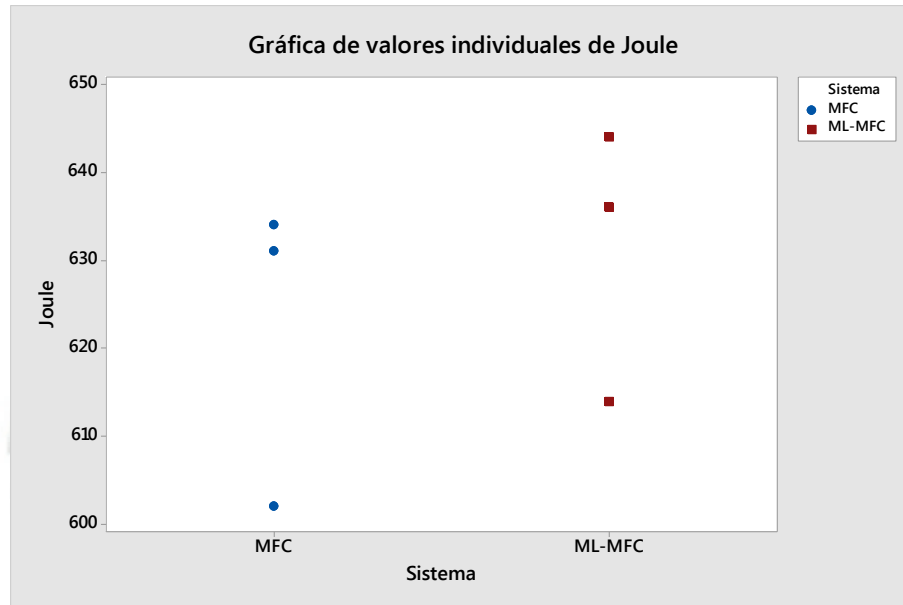


Figura 44. Gráfica para valores de producción energética total en Joules para ML-MFC vs MFC

Rezaei indica que la variabilidad en el desempeño de las celdas de naturaleza microbiológica se debe a los cambios aleatorios en el metabolismo microbiano a lo largo de la descomposición del sustrato, a pesar de ello se logró producir una cantidad significativa de energía en ambos tipos de sistema, con o sin membrana de intercambio protónico [26]. Se esperaba que los sistemas ML-MFC, logran superar a los sistemas MFC; sin embargo, el análisis estadístico descartó una diferencia significativa entre ambos tipos de sistemas. La producción energética total, no suele ser utilizada como un valor referencial entre investigaciones, debido a que depende del tiempo de funcionamiento de los sistemas. Se han repostado sistemas que funcionan apenas unos días, mientras otros pueden mantenerse por periodos de un año o más, siempre que se reemplace el sustrato una vez agotado [70]. En este caso, se consideró como un factor de comparación entre los sistemas; además de facilitar la estimación de la acumulación de la energía.

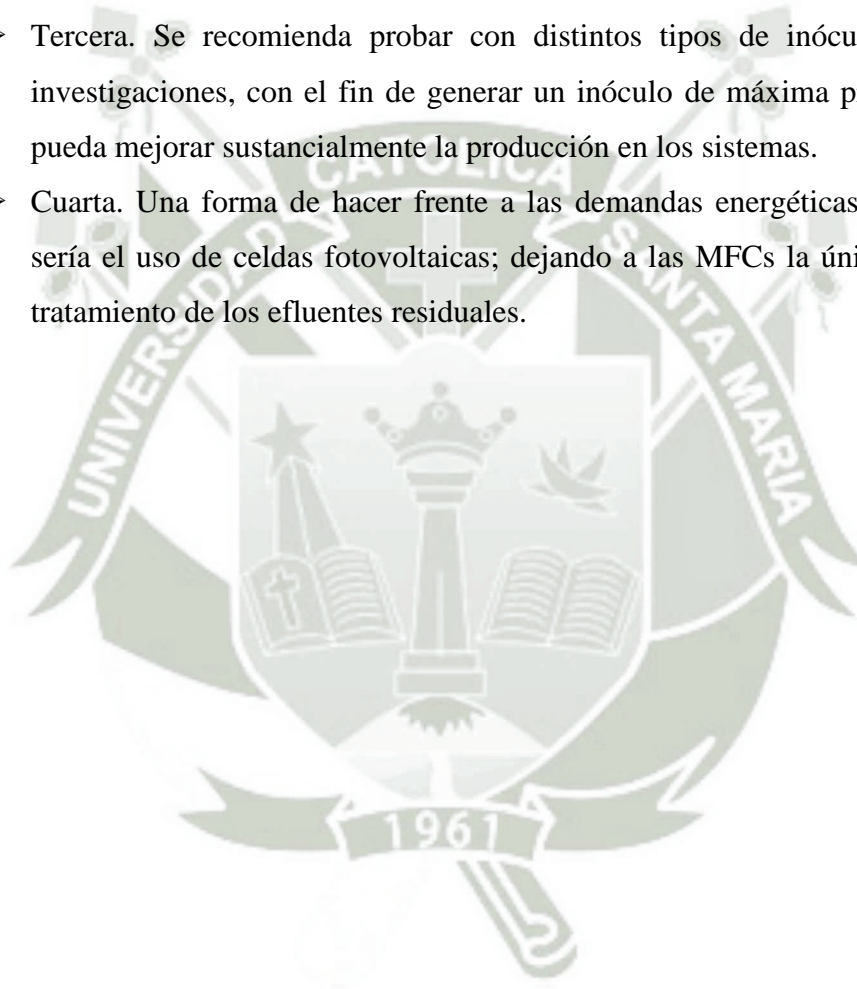
Capítulo IV

4. Conclusiones

- Primera. Es posible generar y acumular energía eléctrica utilizando sistemas de celdas de combustible microbianas (MFC) inoculadas con lodos activos procedentes de la PTAP “La Tomilla”, utilizando agua residual sintética como sustrato, los sistemas lograron funcionar de manera continua por 25 días, bajo continua monitorización.
- Segunda. Se logró diseñar y construir una celda de combustible en ausencia de membrana de intercambio protónico, a este sistema se le llamó ML-MFC.
- Tercera. Se comparó la performance bioelectrogénica de celdas de combustible microbianas con y sin membrana de intercambio protónico (MFC y ML-MFC), donde las celdas de tipo MFC produjeron una media de 622.3 Joules con DE de 17.7, mientras que los sistemas ML-MFC lograron una media 631.33 Joules con DE de 15.5, el análisis estadístico realizado indicó que no existía diferencia significativa entre ambos sistemas, por lo que se demostró que el lazo electrolítico, si bien no supera, puede igualar la producción energética de un sistema que sí cuente con la presencia de una membrana de intercambio protónico.
- Cuarta. Se determinó la evolución de los parámetros fisicoquímicos (COD, DO, ART, Conductividad, Tds), que caracterizaron la performance de cada sistema durante la bioelectrogeneración. Se evaluó cada sistema de ambos tipos (ML-MFC, MFC) al inicio y al final de la etapa de experimentación.
- Quinta. Se analizó estadísticamente todos los resultados obtenidos a través de un sistema triplicado aplicando prueba T pareada y prueba de T-student, con el uso del software Minitab versión 17.2.1. En todas las pruebas realizadas, no se encontró diferencia significativa con IC de 95%. Pudiendo concluir que una MFC con lazo electrolítico puede igualar en todos los aspectos evaluados a una MFC con membrana de intercambio protónico Nafion 117.

5. Recomendaciones

- Primera. Se recomienda reemplazar el agua residual sintética por verdaderos efluentes de desecho, de manera de tener mayor impacto en el campo de tratamiento de desechos.
- Segunda. Se recomienda realizar modificaciones en el diseño del sistema ML-MFC, con el fin de eliminar elementos auxiliares tales, como bombas de aire y peristálticas, de manera de que el gasto energético no resulte contraproducente en la rendición energética final de los sistemas.
- Tercera. Se recomienda probar con distintos tipos de inóculos en futuras investigaciones, con el fin de generar un inóculo de máxima producción, que pueda mejorar sustancialmente la producción en los sistemas.
- Cuarta. Una forma de hacer frente a las demandas energéticas por las MFC, sería el uso de celdas fotovoltaicas; dejando a las MFCs la única función del tratamiento de los efluentes residuales.



Referencias Bibliográficas

- [1] Álvarez Clemente. Bacterias que generan electricidad. *El País*, 2008; pp. 41-42
- [2] Franks A., Nevin K. Microbial Fuel Cells, A Current Review. *Energies*. 2010; (3):899-919
- [3] Du Z., Li H., Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advance*. 2007;(25): 464–482
- [4] Angenent L. T., Khursheed K., Muthanna H., Al-Dahhan, A. Wrenn B., Domínguez-Espinosa R. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends in Biotechnology*. 2014; 22(9):477-485
- [5] Ministerio de Energía y Minas Evolución De Indicadores Del Sector Eléctrico 1995 – 2015. Dirección General de Electricidad Dirección de Estudios y Promoción Eléctrica
- [6] Ministerio de Energía y Minas. *Balance Nacional de Energía*. MEM, 2012
- [7] Ministerio de Energía y Minas. *Balance Nacional de Energía*. MEM, 2014
- [8] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú. Balance Energético neto del Glaciar Qisoquipina en la cordillera Vilcanota. 2014
- [9] Ministerio De Energía Y Minas .Dirección General De Eficiencia Energética. *Plan Energético Nacional*. MEM, 2014-2025.
- [10] Harper G. Fuel Cell Projects for the Evil Genius. 2008. USA: McGrawHill.
- [11] Niessen J., Schröder U., Scholz F. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation – a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochemistry Communications*, 2004;(6):955–958.
- [12] Schröder U. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Phys Chem Chem Phys*, 2007; 9 (21):2619-29.

- [13] Passos V. F., Neto S. A., Rodrigues A. A., Valeria Reginatto. Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater treatment plant. *Scientia Agricola*. 2016; 73(5): 424-428
- [14] Fan L-P, Xue P. Overview on Electricigens for Microbial Fuel Cell. *The Open Biotechnology Journal*. 2016; (10): 398-406
- [15] Revankar S. Majumdar P. FUEL CELLS Principles, Design, and Analysis. 2014 France: CRC Press.
- [16] Rahimnejad M., A Adhami., Darvari S., Zirepour A., Oh S. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*. 2015
- [17] Du Z., Li Q., Tong M., Li S., Li H. Electricity Generation Using Membrane-less Microbial Fuel Cell during Wastewater Treatment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2008; 16(5):772-777.
- [18] Scott K., Hao E. Microbial Electrochemical and fuel cells. 2016. Cambridge: Elsevier.
- [19] Logan B. Microbial fuel cell. 2008. Canada: Wiley.
- [20] Min. B., Kim J.R., Oh. S.E., Regan. J.m., Logan. B.E. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Res*. 2005; 39. 4961-4968.
- [21] Mathuriya A.S. Inoculum selection to enhance performance of a microbial fuel cell for electricity generation during wastewater treatment. *Environmental Technology*, 2013; (34). 1957-1964
- [22] Rabaey K., Verstraete W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*. 2005; 23(6), 291-298.
- [23] Min B., Logan B.E., Oh S. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*. 2004; 38(18):4900-4
- [24] Aelterman, P.; Rabaey, K.; Pham, T. H.; Boon, N.; Verstraete, W. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol*. 2006;(40):3388-3394.

- [25] Zuo Y., Xing D., Regan J. M., Logan B.E. Isolation of the Exoelectrogenic Bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by Using a U-Tube Microbial Fuel Cell. *Applied And Environmental Microbiology*.2008; 74(10): 3130–3137
- [26] Rezaei F. Richard T. Brennan y R. Logan B. Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems. *Environmental science & technology*. 2007; (11):4053-4058.
- [27] Gugliuzza A. y Basile A. Membranes for clean and renewable power applications. 2014. Philadelphia: Woodhead.
- [28] Ieropoulos I., Winfield J., Greenman J. Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 2010; (101):3520–3525
- [29] Pant D., Bogaert G. V., Diels L., Vanbroekhoven K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 2010; (101): 1533–1543
- [30] Biffinger JC, Byrd JN, Dudley BL, Ringeisen BR. Oxygen exposure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells. *Biosens Bioelectron*. 2008; 23:820–826.
- [31] Logan B. E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews* 2009; (7): 375-381.
- [32] Falcón A., Lozano J. E. y Juárez K. Bioelectricidad. *BioTecnología*, 2009; 13(3):62-78
- [33] Logan, B.E. Feature Article: Biologically extracting energy from wastewater: biohydrogen production and microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.*, 2014; 38(9):160A-167A.
- [34] Qian F., Baum M., Gu Q., Morse D.E., A 1.5 μL microbial fuel cell for on-chip bioelectricity generation. *Lab on a Chip*. 2009; (9): 3076–3081
- [35] Seokheun Choi, Junseok Chae. Optimal biofilm formation and power generation in a micro-sized microbial fuel cell (MFC). *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013; (195):206-212

- [36] Park. J., Wang H., Ren Z., Active Energy Harvesting from Microbial Fuel Cells at the Maximum Power Point without Using Resistors. *Environ. Sci. Technol.* 2016;(46): 5247–5252
- [38] Logan E. B., Regan M J. Microbial Challenges and Fuel Cells Applications. *Environmental Science & Technology* 2016; 5172-5180.
- [39] Tardast A., Najafpour D. G., Rahimnejad M. y Amiri A. Bioelectrical Power Generation in a Membrane less Microbial Fuel Cell. *World Applied Sciences Journal.* 2016; 16 (2): 179-182
- [40] Sun G., Rodrigues D., Thygesen A., Daniel G., Fernando D., Meyer S. A. Inocula selection in microbial fuel cells based on anodic biofilm abundance of *Geobacter sulfurreducens*. *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 2015; 24(3): 379-387
- [41] Zhu G., Onodera T., Tandukar M., Spyros G. Pavlostathis. Simultaneous carbon removal, denitrification and power generation in a membrane-less microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 2013; (146):1-6
- [42] Bond D. R. Lovley R.D. Electricity production By *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *Applied and environmental Microbiology*, 2003;69 (3):1548-1555
- [43] Heijne A., Hamelers H. V. M., de Wilde V., Rozendal R. A., Buisman C. J. N. A bipolar membrane combined with ferric iron reduction as an efficient cathode system in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.* 2006; (40):5200–5205
- [44] You S., Zhao Q., Zhang J., Jiang J., Zhao S. Short communication a microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor. *J. Power Sources* 2006;162:1409–1415.
- [45] Methe, B.A., Nelson, K.E., Eisen, J.A., Paulsen, I.T., Nelson, W., Heidelberg, J.F., Wu, D., et al. Genome of *Geobacter sulfurreducens*: Metal reduction in subsurface environments. *Science* 2013; 302(5652): 1967- 1969.
- [46] Tamakloe R. Y, Agamasu H, Singh K. Power Generation by Double Chamber Membrane-Less Microbial Fuel Cells (MLMFCs). *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 2014;5 (7):30-38.

- [47] Watson V., Logan B. Power Production in MFCs Inoculated With *Shewanella oneidensis* MR-1 or Mixed Cultures. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009; 5(3):489-498
- [48] Shi L., Squier T. C. , Zachara J. M., Fredrickson J. K. Respiration of metal (hydr)oxides by *Shewanella* and *Geobacter*: a key role for multihaem c-type cytochromes. *Molecular Microbiology*. 2007; 65(1): 12–20
- [49] Leang C, Qian X, Mester T, Lovley D. Alineación del citocromo OmcS de tipo c a lo largo de pili de *Geobacter sulfurreducens*. *Appl Environ Microbiol*. 2010; 76 (12): 4080-4
- [50] Parameswaran P, Bry T, Popat SC3. Kinetic, electrochemical, and microscopic characterization of the thermophilic, anode-respiring bacterium *Thermincola ferriacetica*. *Environ Sci Technol*. 2013; (47):4934–40
- [51] Park D. H., Laivenieks M., Guettler M. V. Microbial utilization of electrically reduced neutral red as the sole electron donor for growth and metabolite production. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999; (65): 2912-2917
- [52] Maeda H, Matsu-ura S, Yamauchi Y, Ohmori H. Resazurin as an electron acceptor in glucose oxidase-catalyzed oxidation of glucose. *Chem Pharm Bull*. 2001; (49):622–625
- [53] Zhang F., Ahn Y., Logan B. E. Treating refinery wastewaters in microbial fuel cells using separator electrode assembly or spaced electrode configurations. *Bioresource Technology*. 2014; 152: 46–52
- [54] Garner, L.E., Thomas, A.W., Sumner, J.J., Harvey, S.P., Bazan, G.C. Conjugated oligoelectrolytes increase current response and organic contaminant removal in wastewater microbial fuel cells. *Energy Environ. Sci*. 2012;(5):9449–9452.
- [55] Hinks, J., Wang, Y., Poh, W.H., Donose, B.C., Thomas, A.W., Wuertz, S., Loo, S.C.J., Bazan, G.C., Kjelleberg, S., Mu, Y., Seviour, T. Modeling cell membrane perturbation by molecules designed for transmembrane electron transfer. *Langmuir* 2014; (30): 2429–2440
- [56] Hinks, J., Han, P.W., Chu, J.J.H., Loo, J.S.C., Bazan, G.C., Hancock, L.E., Wuertz, S. Oligo-polyphenylenevinylene conjugated oligoelectrolyte

- membrane insertion molecules selectively disrupt cell envelopes of Gram-positive bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 2015; 81 (6): 1949–1958
- [57] Rotarua A., Shrestha Pravin M., Liu F., Markovaitea B., Chena S., Nevina K., Lovley D. Direct Interspecies Electron Transfer Between *Geobacter metallireducens* and *Methanosarcina barkeri*. *American Society for Microbiology.* 2014; 80;(15):4599-4605
- [58] Lee, J., Phung, N.T., Chang, I.S., Kim, B.H., Sung, H.C. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses. *FEMS Microbiol.* 2003; (223): 185–191.
- [59] Min, B., Cheng, S., Logan, B.E. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research.* 2004; 39(9):1675-86
- [60] Prasad D., Sivaram T.K. Berchmans S., Yegnaraman V. Microbial fuel cell constructed with a micro-organism isolated from sugar industry effluent. *J Power Sources.* 2006; (160): 991-996.
- [61] Holmes, D.E., Bond, D.R., O'Neilr, A., Reimers, C.E., Tender, L.R. and Lovley, D.R. Microbial communities associated with electrodes harvesting electricity from a variety of aquatic sediments. *Microbial Ecol* 2004; (48):178–190
- [62] Wilkins D., Rao S., Lu X., Lee. P. H. Effects of sludge inoculum and organic feedstock on active microbial communities and methane yield during an aerobic digestion. *Frontiers in Microbiology*, 2015; (6): 1-11.
- [63] Yusoff M., Hu A., Feng C., Maeda T., Shirai Y., Hassan M., Yu C. Influence of pretreated activated sludge for electricity generation in microbial fuel cell application. *Bioresource Technology.* 2013; (145):90-6.
- [64] Franks E., Nevin P. Microbial Fuel Cells, A Current Review. *Energies.* 2010;3: 899-919
- [65] Rikame S. S., Mungray A.A. y Mungray A.K. Electricity generation from aidogenic food waste lechate using dual chamber mediator less microbial fuel cell. *International Bio-deterioration and Biodegradation.* 2012;(75): 131-137.
- [66] Wang X., Feng Y. J. y Lee H. Electricity production from beer brewery waste water using single chamber microbial fuel cell. *Water Science & Technology.* 2008; 57(7): 117-121.

- [67] Moqsud M. A., Omine K., Yasufuku N., Hyodo M., Nakata Y. Microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation from organic wastes. *Waste Management* 2013;33:2465-2469
- [68] Zhang B., Zhao H., Zhou S., Shi C., Wang C., Ni J. A novel UASB–MFC–BAF integrated system for high strength molasses wastewater treatment and bioelectricity generation. *Bioresource Technology*, 2009;100, 5687–5693.
- [69] Cheng J. Zhu X. Ni J., Borthwick A. Palm oil mill effluent treatment using two stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters. *Bioresour Technol* 2010; 101(8):2729-2734.
- [70] Aldrovandi A., Marsili E., Stante L., Paganin P., Tabacchioni S., Giordano A. (2009). Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 2009;(100):3252–3260
- [71] Jagtap Y. D., Jadhav G. S. Performance Of Dual-Chambered Membrane Less Microbial Fuel Cell With Anaerobic Cathode. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013;2(3): 1-4
- [72] Kim J. R. Development of Microbial Fuel Cells (MFCs) Using Efficient Acclimation and Various Substrates. 2006. The Pennsylvania State University.
- [73] Logan E. B., Wallack J. M., Kim K-Y., He W., Feng Y., Saikaly E. P. Assessment of Microbial Fuel Cell Configurations and Power Densities. *American Chemical Society*, 2015: 206-214
- [74] Mohan S. V., Raghavulu S. V., Srikanth S., Sarma N. P. Bioelectricity production by mediatorless microbial fuel cell under acidophilic condition using wastewater as substrate: Influence of substrate loading rate. *Current Science*, 2007;92(12):1720-1726
- [75] Li W.W, Sheng G-P , Liu W-X, Yu Q-H. Recent advances in the separators for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 2011;(102): 244-252
- [76] Biffinger JC1, Ray R, Little B, Ringeisen B.R. Diversifying biological fuel cell designs by use of nanoporous filters. *Environ Sci Technol*. 2007;41(4):1444-9.
- [77] Logan B., Melers B., Reneaerzenda, Schroder U., Jurgkeller, Freguia S., Peteraelterman, Willyverstrae, Korneelrabaey. *Microbial Fuel Cells:*

- Methodology and Technology. *American Chemical Society*, 2006;40(17): 5181-5192
- [78] Liu, H., Cheng, S., Logan, B. E. Power Generation in Fed-Batch Microbial Fuel Cells as a Function of Ionic Strength, Temperature, and Reactor Configuration. *Environ.Sci. Technol.*,2005; 39:5488–5493.
- [79] Mali B.M., Gavimath C.C., Hooli V. R., Patil A.B., Gaddi D.P, Ternikar C.R., Ravishankera B.E. Generation of Bioelectricity using waste water. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 2012; 3(1):537-540
- [80] Gowdhamamoorthi M., Arun A., Kiruthika S., Muthukumaran B. Enhanced Performance Of Membraneless Fuel Cells. *International Journal of ChemTech Research*, 2013;5(3): 1143-1151
- [81] Boylestad R. L. Análisis Introductorio de Circuitos. 2003. México: Pearson Education
- [82] Alexander C. K., Matthew N. Sadiku O., 2006 Fundamentos de Circuitos Eléctricos. México: McGraw-Hill
- [83] Gussow M. Fundamentos de Electricidad.1993. México: McGraw-Hill
- [84] Hermosa A. Principios de electricidad y electrónica. Marcombo, 2005. España II edición
- [85] Ghangrekar M. M. y Shinde V. B. Simultaneous sewage treatment and electricity generation in membrane-less microbial fuel cell. *Water Science & Technology*, 2008;(58):37-43
- [86] Khan M. R., Karim M. R., Amin M. S. A. Generation of Bio-electricityby Microbial Fuel Cells. *International Journal of Engineering and Technology*. 2013;1(3): 231-237.
- [87] Mott L. R..Mecánica de fluidos. 2006; México: Pearson Education.
- [88] Jiang D, Li B, Jia W, Lei Y. Effect of inoculum types on bacterial adhesion and power production in microbial fuel cells. *Appl Biochem Biotechnol*, 2010;160 (1):182-196

- [89] Organización Panamericana de la Salud. Manual de esterilización para Centros de Salud. 2008 Manual de Procedimientos Analíticos para Aguas y Efluentes.
- [90] Zhen H. Development of Microbial Fuel Cells Needs To Go beyond “Power Density”. *American Chemical Society*. 2017; (2):700-702.
- [91] Jadhav G.S., Ghangrekar M.M. Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Bioresource Technology*, 2009; (100):717–723
- [92] Tartakovskya B, Manuela M.-F, Wangb H., Guiota S.R.. High rate membrane-less microbial electrolysis cell for continuous hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*. 2008;(34): 672 – 677
- [93] Urbinati E., Alves R. Anaerobic-Aerobic Treatment Of Swine Wastewater In Uasb And Batch Reactors In Series. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 2014;34(1): 124-142
- [94] ElMekawy A., Srikanth S., Bajracharya S., Hanaa M. Hegab, Nigam P. S., Singh A., S. Mohan V, Pant D. Food and Agricultural Wastes as Substrates for Bioelectrochemical System(BES): *The Synchronized Recovery of Sustainable Energy and Waste Treatment*. *Food Research International*. 2014; (73):213-225
- [95] Moqsud A. M., Hannan M. A., Omine K. Assessment of factors influencing bioelectricity generation in paddy plant microbial fuel cells. *Global Advanced Research Journals*. 2015, 4(12): 840-850.
- [96]Bergoña F.B. Análisis de los datos en un proyecto de investigación. *Matronas Profesión*. 2005; 6(3): 30-36.

Anexos

Anexo 1

Anode materials	MFC efficiency	References
Cu	40 W m ⁻² based on anode area; the higher power density must either be a calculation error, or due solely to copper corrosion with the solution used in the tests (Zhu and Logan, 2014) 2±0.5 mW m ⁻² based on anode area	Kargi and Eker (2007) Zhu and Logan (2014)
Stainless steel	23 mW m ⁻² based on anode area Maximum current density of stainless steel electrode was around 2.4 A m ⁻² vs. 1.1 A m ⁻² of graphite electrode (constant potential chronoamperometry) Maximal current densities reached under constant polarization at -100 mV vs. SCE: 3.1 A m ⁻² for plain stainless steel, 5.9 A m ⁻² for plain graphite, and 8.2 A m ⁻² for stainless steel grid, each of 25 cm ² projected area	Dumas et al. (2007) Dumas et al. (2008) Erable and Bergel (2009)
Ti	No date of power density of Ti because daily current densities of Ti was far low ~0.1 A m ⁻² than that of flat graphite, roughened graphite, and Pt-coated Ti with values between 2 and 2.5 A m ⁻²	ter Heijne et al. (2008)
Ag	0.8 mW m ⁻² of Al electrode vs. 1.8 mW m ⁻² carbon fiber cloth electrode	Ouitrakul et al. (2007)
Al	0.004 mW m ⁻² of Al electrode vs. 1.8 mW m ⁻² carbon fiber cloth electrode	Ouitrakul et al. (2007)
Ni	0.2 mW m ⁻² of Al electrode vs. 1.8 mW m ⁻² carbon fiber cloth electrode	Ouitrakul et al. (2007)
Stainless steel	0.1 mW m ⁻² vs. 1.8 mW m ⁻² carbon fiber cloth electrode	Ouitrakul et al. (2007)
Pt	78 W m ⁻² for Pt nanoelectrode was connected to the wire covered with nanoparticle Ti vs. 35.08 W m ⁻² of simple electrode Pt to the simple Ti wire	Torabiyani et al. (2014)
Au	Maximum power density of 0.15 μW cm ⁻² Maximum power density of 95 μW cm ⁻² vs. results from Qian et al. (2009)	Qian et al. (2009) Choi and Chae (2013)

Figura 45. Materiales utilizados como ánodos en MFCs [16]

Anexo 2

Microbes used in MFCs	Substrate	Applications
<i>Microbes</i>		
<i>Actinobacillus succinogenes</i>	Glucose	Neutral red or thionin as electron mediator (Park and Zeikus, 2000; Park and Zeikus, 1999; Park et al., 1999)
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Acetate	Mediator-less MFC Pham et al. (2003)
<i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Enterococcus gallinarum</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glucose	Self-mediate consortia isolated from MFC with a maximal level of 4.31 W m ⁻² . Rabaey (2004)
<i>Clostridium beijerinckii</i>	Starch, glucose, lactate, molasses	Fermentative bacterium Niessen et al. (2004b)
<i>Clostridium butyricum</i>	Starch, glucose, lactate, molasses	Fermentative bacterium (Niessen et al., 2004b; Park et al., 2001)
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Sucrose	Sulphate/sulphide as mediator (Ieropoulos et al., 2005a; Park et al., 1997)
<i>Erwinia dissolven</i>	Glucose	Ferric chelate complex as mediators Vega and Fernandez, (1987)
<i>Escherichia coli</i>	Glucose sucrose	Mediators such as methylene blue needed. (Schroder et al., 2003; Ieropoulos et al., 2005a; Grzebyk and Pozniak, 2005)
<i>Geobacter metallireducens</i>	Acetate	Mediator-less MFC Mim et al. (2005a)
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Acetate	Mediator-less MFC (Bond and Lovley, 2003; Bond et al., 2002)
<i>Gluconobacter oxydans</i>	Glucose	Mediator (HNQ, resazurin or thionine) needed Lee et al. (2002)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Glucose	HNQ as mediator biomimetalized manganese as electron acceptor (Rhoads et al., 2005; Menicucci et al., 2006)
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Glucose	Ferric chelate complex as mediators (Vega and Fernandez, 1987)
<i>Proteus mirabilis</i>	Glucose	Thionin as mediator (Choi et al., 2003; Thurston et al., 1985)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glucose	Pyocyanin and phenazine-1-carboxamide as mediator (Rabaey et al., 2004, 2005a)
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Glucose, xylose sucrose, maltose	Mediator-less MFC (Chaudhuri and Lovley, 2003; Liu et al., 2006)
<i>Shewanella oneidensis</i>	Lactate	Anthraquinone-2,6-disulfonate (AQDS) as mediator (Ringseisen et al., 2006)
<i>Shewanella putrefaciens</i>	Lactate, pyruvate, acetate, glucose	Mediator-less MFC (Kim et al., 1999a,b); but incorporating an electron mediator like Mn (IV) or NR into the anode enhanced the electricity production (Park and Zeikus, 2002)
<i>Streptococcus lactis</i>	Glucose	Ferric chelate complex as mediators (Vega and Fernandez, 1987)

Figura 46. Microorganismos y sustratos utilizados en MFCs [29]

Anexo 3

Table 1.1 Typical performance of microbial fuel cells

MFC configuration	Substrate	COD (mg/L)	COD removal (%)	Current density (mA/m ²)	Typical power density (mW/m ²)
Single chamber, air cathode	Starch processing wastewater	4850	98	900	2200
Double cell design	Diesel contaminated wastewater (C8 to C25s)	300	82	-	32
Dual chamber fuel cell	Filtrated wastewater plus acetate	1130	-	550	130
Single-chamber air cathode	Synthetic: starch, peptone, and fish extract	289,000	95-93	-	800-900
Single chamber, down-flow	Landfill leachate	468-630 (BOD)	57% (BOD)	3.24	0.19
Graphite-granule anode, tubular air-cathode MFC	Glucose	1000	-	216,000	-
Single-chamber MFC	Domestic wastewater	220	40-80	12	12-26
Membrane-less MFC	Glucose and glutamate	300	90	-	1.3
Dual-chambered MFC	Diluted cereal wastewater	595	95	-	81
Single-chambered air-cathode MFC	Swine wastewater	8320-830	27	-	110-261
	(i) Nondiluted		92		
	(ii) Diluted (1:10)		42		
Flat plate MFC carbon paper anode and carbon cloth cathode	Domestic wastewater	1000	79	-	72
Air-cathode single-chamber MFC using PEM	Domestic wastewater	200-300	-	-	43
	Glucose	600	33	-	28
	Settled sewage	70-20	-	-	262
	Cellulose	-	-	-	2
Dual-chambered MFC	Acetate	1000	-	8	55
Single-chamber air-cathode MFC graphite brush anode			-		2400 (cathode area)

Figura 47. Típico desempeño de diversas configuraciones de MFCs [18]

Anexo 4: Pruebas Estadísticas Realizadas

OXIGENO DISUELTO: IC y Prueba T pareada: inicial OD, final OD

T pareada para inicial OD - final OD

		Error estándar de la media		
	N	Media	Desv.Est.	
inicial OD	6	4.6500	0.0000	
final OD	6	2.2367	0.0635	
Diferencia	6	2.4133	0.0635	

IC de 95% para la diferencia media: (2.3467, 2.4799)
Prueba t de diferencia media = 0 (vs. ≠ 0): Valor T = 93.16 Valor p = 0.000

Como el valor p es menor a 0.05 (valor $p < 0.05$), entonces si existe diferencia estadística al nivel de confianza de 95%.

T-student: de cc final OD (ppm), para ML – MFC vs cc final OD (ppm) MFC

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$
 Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

T de dos muestras para final OD (ppm)

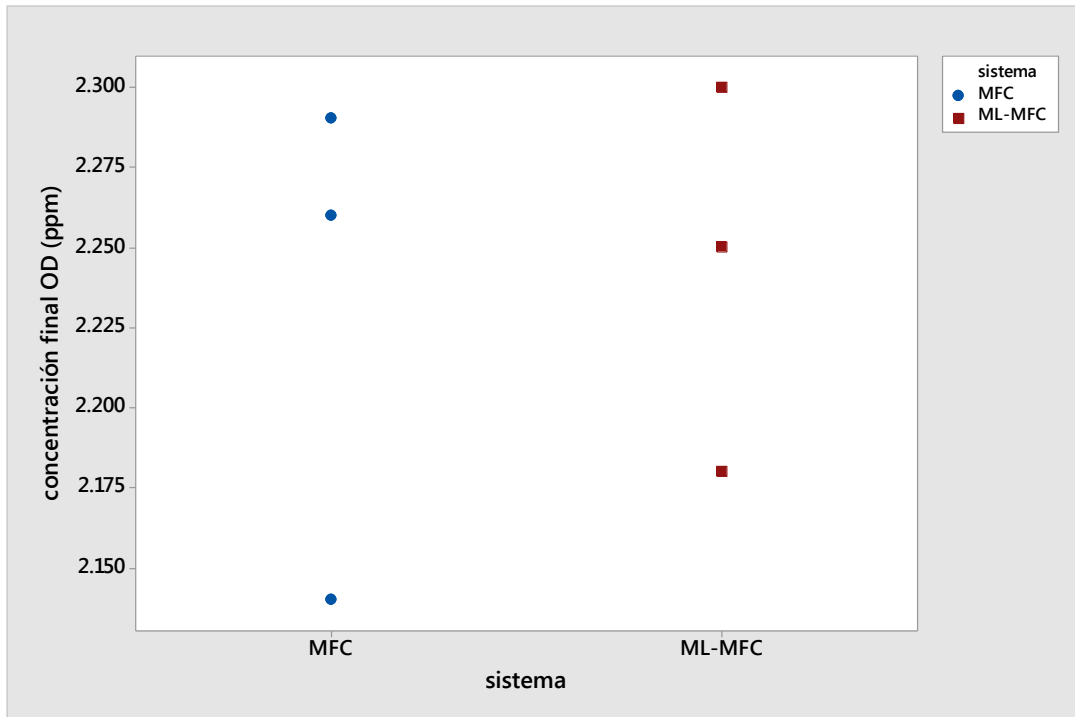
		Error estándar de la media		
sistema	N	Media	Desv.Est.	
MFC	3	2.2300	0.0794	
ML-MFC	3	2.2433	0.0603	

Diferencia = μ (MFC) - μ (ML-MFC)

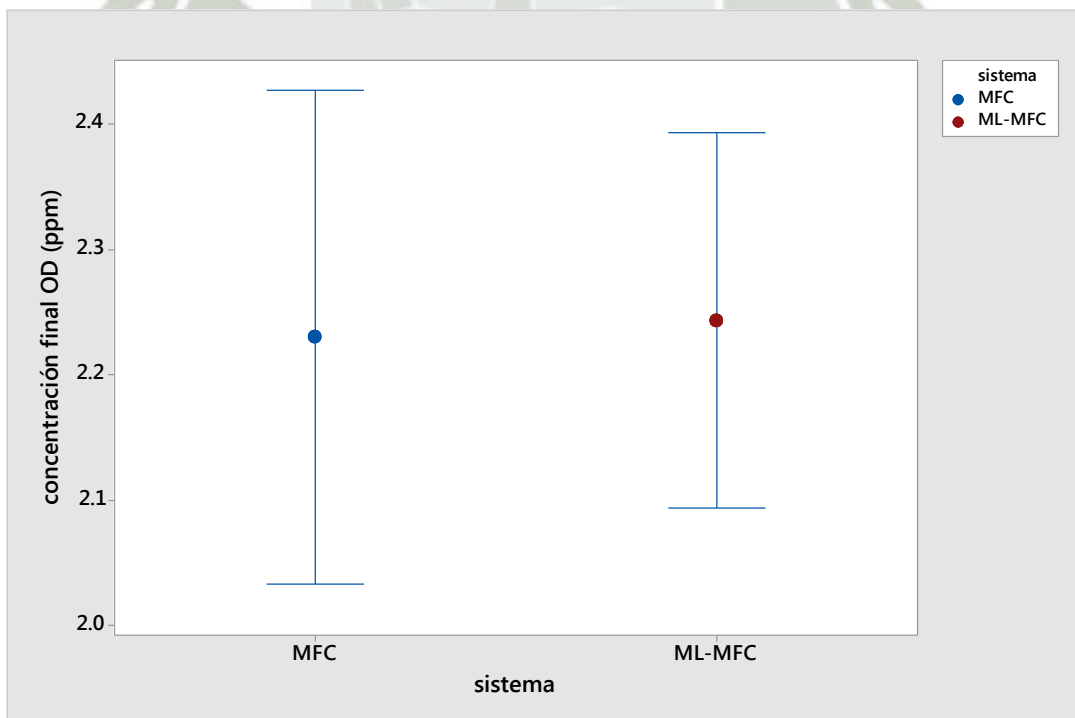
Estimación de la diferencia: -0.0133

IC de 95% para la diferencia: (0.1731, 0.1464)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. ≠): Valor T = 0.23 **Valor p = 0.828** GL = 4
Ambos utilizan Desv.Est. agrupada = 0.0705



Valores individuales de final OD (ppm) de ML-MFC vs MFC



Intervalos de concentración final OD (ppm) para ML-MFC vs MFC

CONDUCTIVIDAD

IC y Prueba T pareada: inicial uS, final uS

T pareada para inicial uS - final uS

		Error		
		estándar		
		de la		
	N	Media	Desv.Est.	
media				
inicial uS	6	800.00	0.00	
final uS	6	919.17	14.62	
Diferencia	6	119.17	14.62	

IC de 95% para la diferencia media:
(134.51, 103.82)

Prueba t de diferencia media = 0 (vs. ≠ 0): Valor T = -19.96 Valor p = 0.000

Como el valor p es menor a 0.05, entonces existe diferencia estadística al nivel de confianza de 95%

T-student: de cc final de conductividad (uS/cm) de ML – MFC vs MFC

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$
 Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

T de dos muestras para cc final conductividad(uS/cm)

		Error		
		estándar		
		de la		
sistema	N	Media	Desv.Est.	media
MFC	3	916.0	16.7	9.6
ML-MFC	3	922.3	15.0	8.7

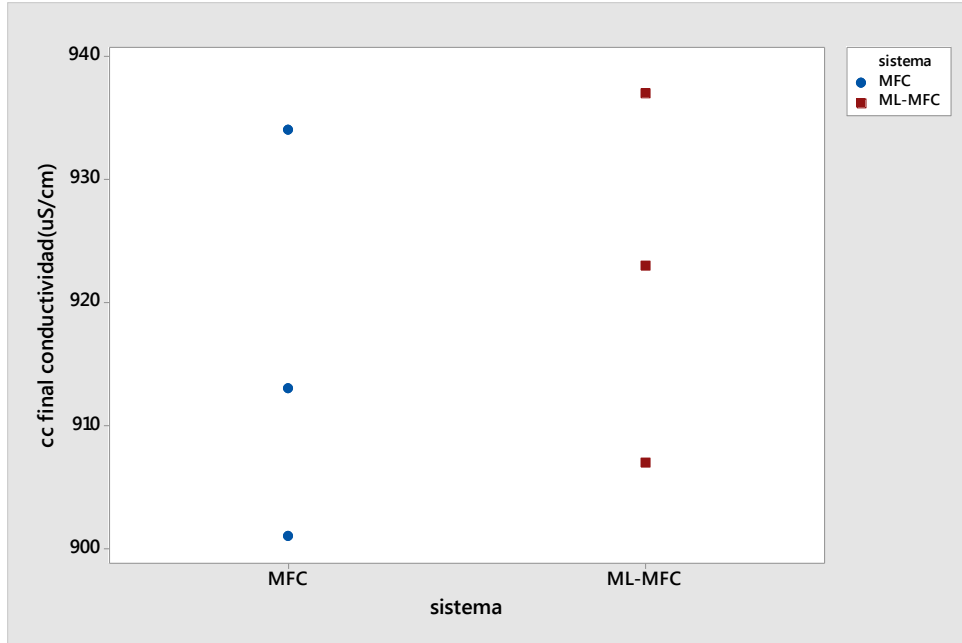
Diferencia = μ (MFC) - μ (ML-MFC)

Estimación de la diferencia: -6.3

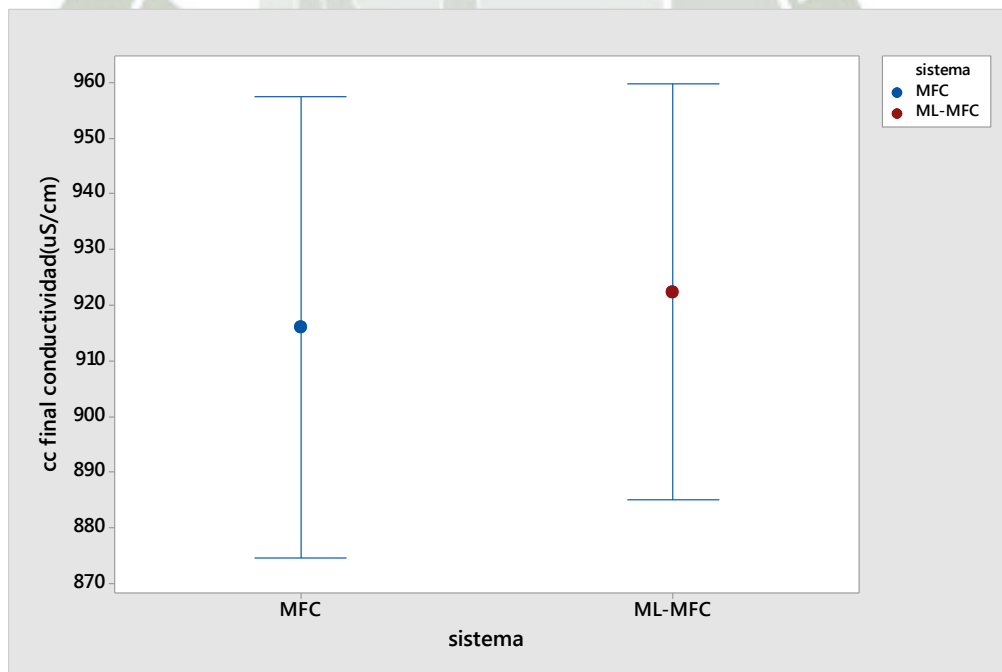
IC de 95% para la diferencia: (42.3, 29.7)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. ≠): Valor T = 0.49 Valor p = 0.651 GL = 4

Ambos utilizan Desv.Est. agrupada = 15.8798



Valores individuales de cc final de conductividad (uS/cm) de ML-MFC vs MFC



Gráfica de intervalos de cc final conductividad (uS/cm) de ML-MFC vs MFC

PORCENTAJE DE DISMINUCIÓN: COD

IC y Prueba T pareada: COD inicial, COD final

T pareada para COD inicial - COD final

		Error estándar de a	
	N	Media	Desv.Est.
media			
COD inicial	6	198.00	0.00
COD final	6	48.17	7.99
Diferencia	6	149.83	7.99
		3.26	

IC de 95% para la diferencia media:
(141.45, 158.21)

Prueba t de diferencia media = 0 (vs. ≠
0): Valor T = 45.96 Valor p = 0.000

T-student: % DQO Consumo de ML – MFC vs % DQO Consumo MFC

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

T-student de dos muestras para % DQO Consumo

Error
estándar
de la

media	N	Media	Desv.Est.	media
MFC	3	73.74	3.81	2.2
ML-MFC	3	77.61	3.86	2.2

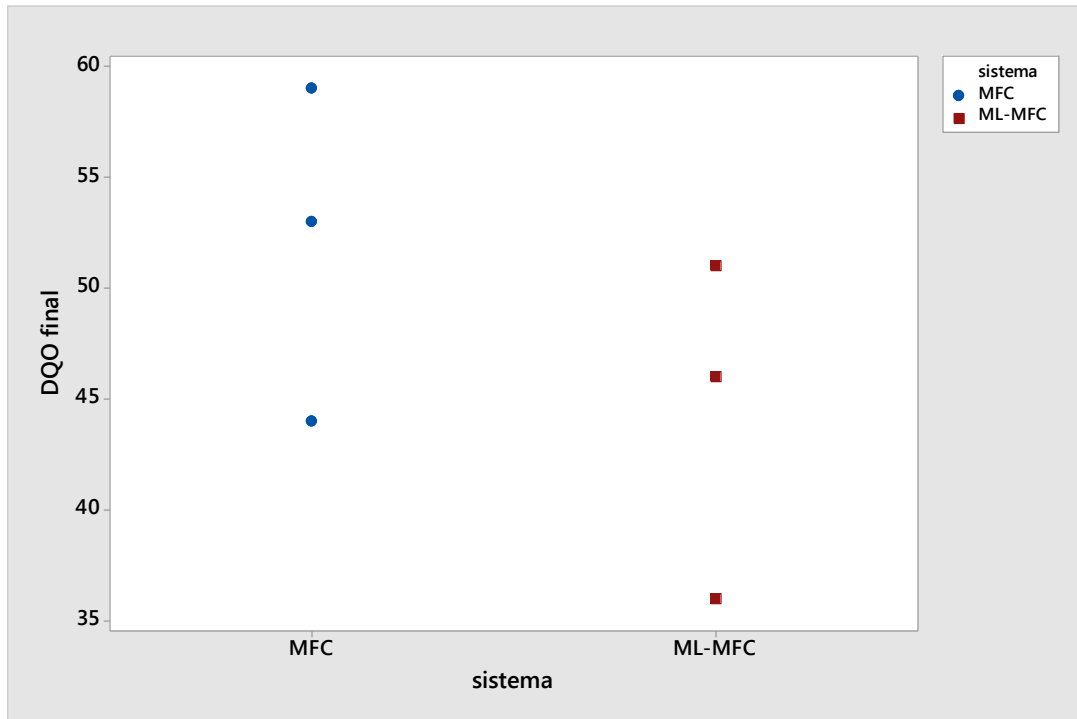
Diferencia = μ (MFC) - μ (ML-MFC)

Estimación de la diferencia: -3.87

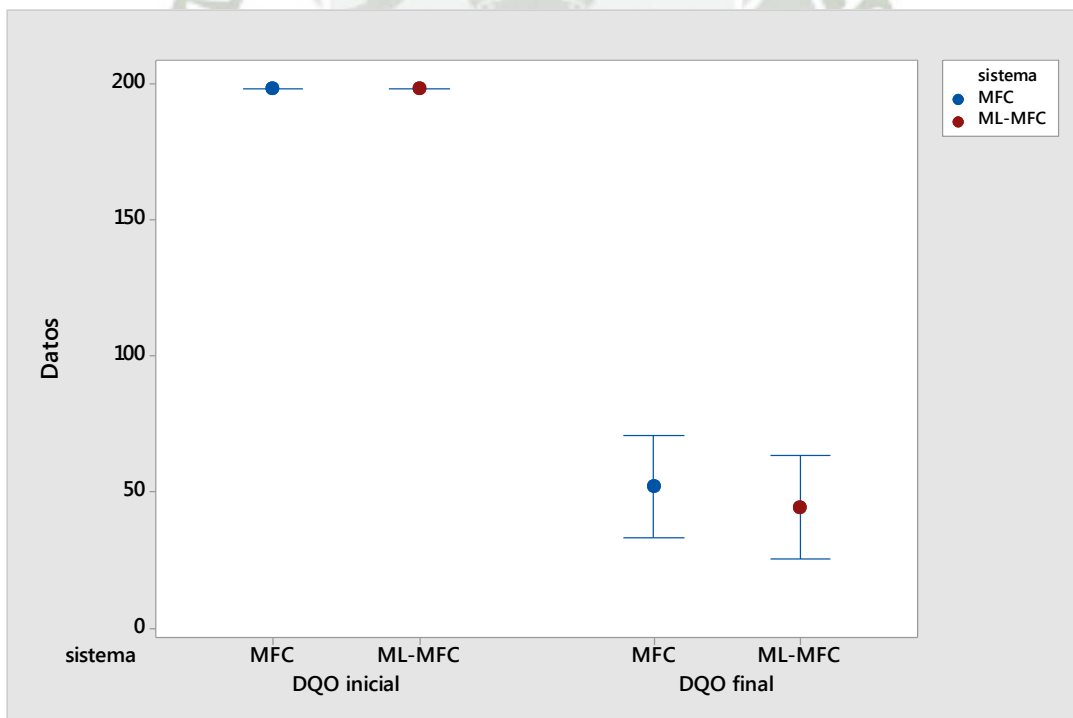
IC de 95% para la diferencia: (12.57, 4.82)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. ≠): Valor T = 1.24 Valor p = 0.284 GL = 4

Ambos utilizan Desv.Est. agrupada = 3.8353



Valores individuales de DQO final de ML-MFC vs MFC



Intervalos de DQO inicial de MFC y ML-MFC vs DQO final de MFC y ML-MFC

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

IC y Prueba T pareada: inicial ppm TDS, final ppm TDS

T pareada para inicial ppm TDS - final ppm TDS

		Error	
		estándar	
		de	
la			
	N	Media	Desv.Est.
media			
inicial ppm TDS	6	401.00	0.00
0.00			
final ppm TDS	6	483.50	12.05
4.92			
Diferencia	6	-82.50	12.05
4.92			

IC de 95% para la diferencia media: (95.14, 69.86)

Prueba t de diferencia media = 0 (vs. \neq 0):
Valor T = -16.78 Valor p = 0.000

- VALOR "P": 0.000

T-student: de cc final de TDS (ppm) de ML – MFC vs cc final TDS (ppm) de

MFC

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente

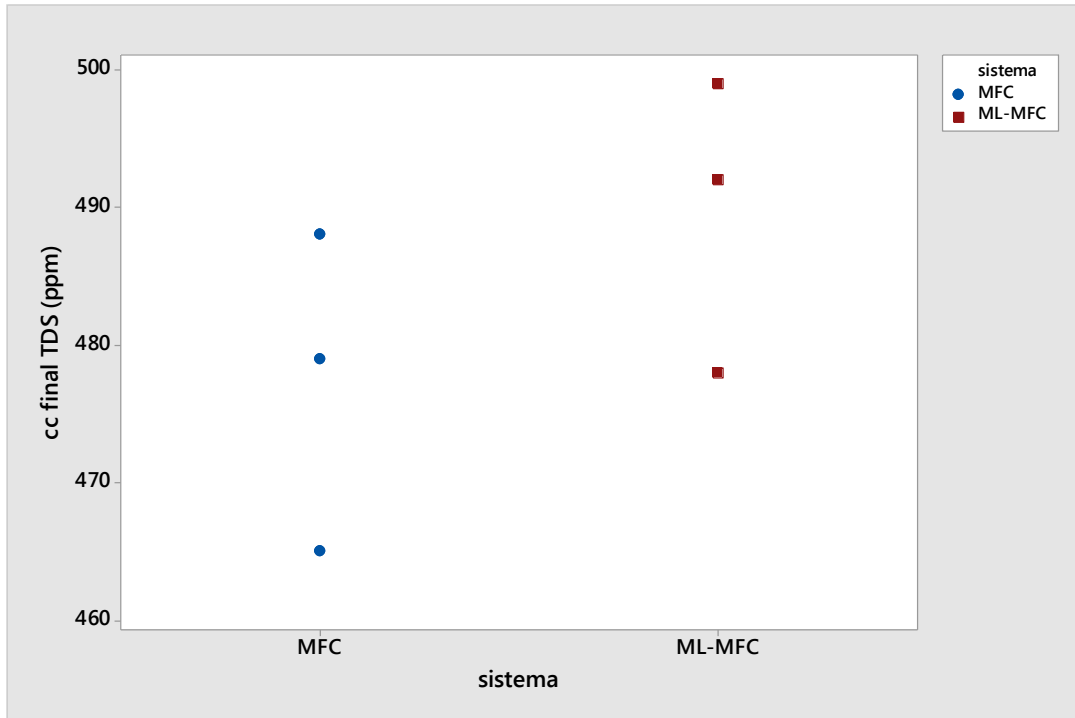
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

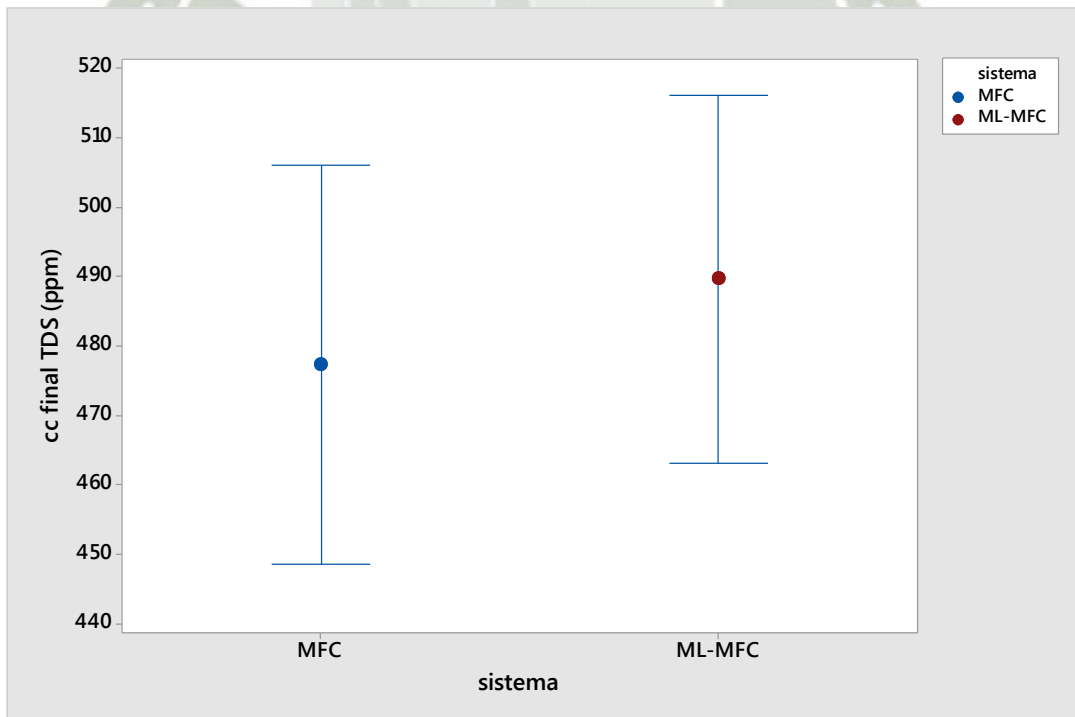
T de dos muestras para cc final TDS (ppm)

		Error	
		estándar	
		de la	
sistema	N	Media	Desv.Est.
MFC	3	477.3	11.6
ML-MFC	3	489.7	10.7
			6.2
Diferencia = μ (MFC) - μ (ML-MFC)			
Estimación de la diferencia:		12.33	
IC de 95% para la diferencia:		(37.61, 12.94)	

Prueba T de diferencia = 0 (vs. ≠): Valor T = 1.35 Valor p = 0.247 GL = 4
Ambos utilizan Desv.Est. agrupada = 11.1505



Valores individuales de cc final TDS (ppm) de ML-MFC vs MFC



Intervalos de cc final TDS (ppm) de ML-MFC vs MFC

DENSIDAD DE POTENCIA

T-STUDENT: densidad de potencia (mW/m²) de ML-MFC VS MFC

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

T de dos muestras para densidad de potencia (mW/m²)

sistema	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
MFC	3	197.37	5.60	3.2
ML-MFC	3	200.22	4.93	2.8

Diferencia = μ (MFC) - μ (ML-MFC)

Estimación de la diferencia: -2.85

IC de 95% para la diferencia: (16.57, 10.86)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. \neq): Valor T = 0.66 Valor p = 0.555 GL = 3

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA TOTAL EN JOULES

T student de Joules de Sistema ML- MFC vs Joule de sistema MFC

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis. Distribución de datos dentro de los datos. Cercanos al promedio

T de dos muestras para Joule

Sistema	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
MFC	3	622.3	17.7	10
ML-MFC	3	631.3	15.5	9.0

Diferencia = μ (MFC) - μ (ML-MFC)


Estimación de la diferencia: -9.0

IC de 95% para la diferencia: (52.2, 34.2)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. \neq): Valor T = 0.66 Valor p = 0.555 GL = 3



Como el valor p es mayor a 0.05 (valor $p > 0.05$), entonces no existe diferencia estadística al nivel de confianza de 95%.

Anexo 5



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ + 51 54 382038 ANEXO 1166
 ✉ laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Apto. 1350
 AREQUIPA - PERU

INFORME DE ENSAYO
Nº DE INFORME: ANA15L16.002514

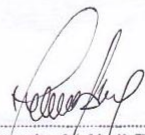
Nombre del Cliente	: HELLEN CALDERON CASTILLA
Dirección del Cliente	: LAS CASUARINAS E 17
RUC	: NO CORRESPONDE
Condición del Muestreado	: POR EL CLIENTE
Descripción	: MEDIOS DE CULTIVO VARIOS
Tamaño de muestra	: 200 mL
Fecha de Recepción	: 15/12/2016
Fecha de Inicio del Ensayo	: 15/12/2016
Fecha de Emisión de Informe	: 22/12/2016
Página	: 1 de 1

I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:

ANÁLISIS	RESULTADO
DETERMINACIÓN DE REDUCTORES DIRECTOS Y TOTALES EN ALIMENTOS (g/L) Method of Test for Total and Direct Reducing Substances in Food. Normas mexicanas. NMX-F-312-1978.	
Muestra 07	< 0,1
Muestra 08	< 0,1
Muestra 09	< 0,1
Muestra 10	< 0,1
Muestra 11	< 0,1
Muestra 12	< 0,1

OBSERVACIONES:

- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL –DA.
- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad



Q.F. Ricardo A. Abril Ramírez
 CQFDA 00824
 ESPECIALISTA EN CONTROL DE CALIDAD LECC




Figura 48. Resultados de análisis de azúcares reductores totales para las muestras después de la fase experimental. Laboratorio de Control de Calidad de la UCSM

Anexo 6: Diseño lazo electrolítico

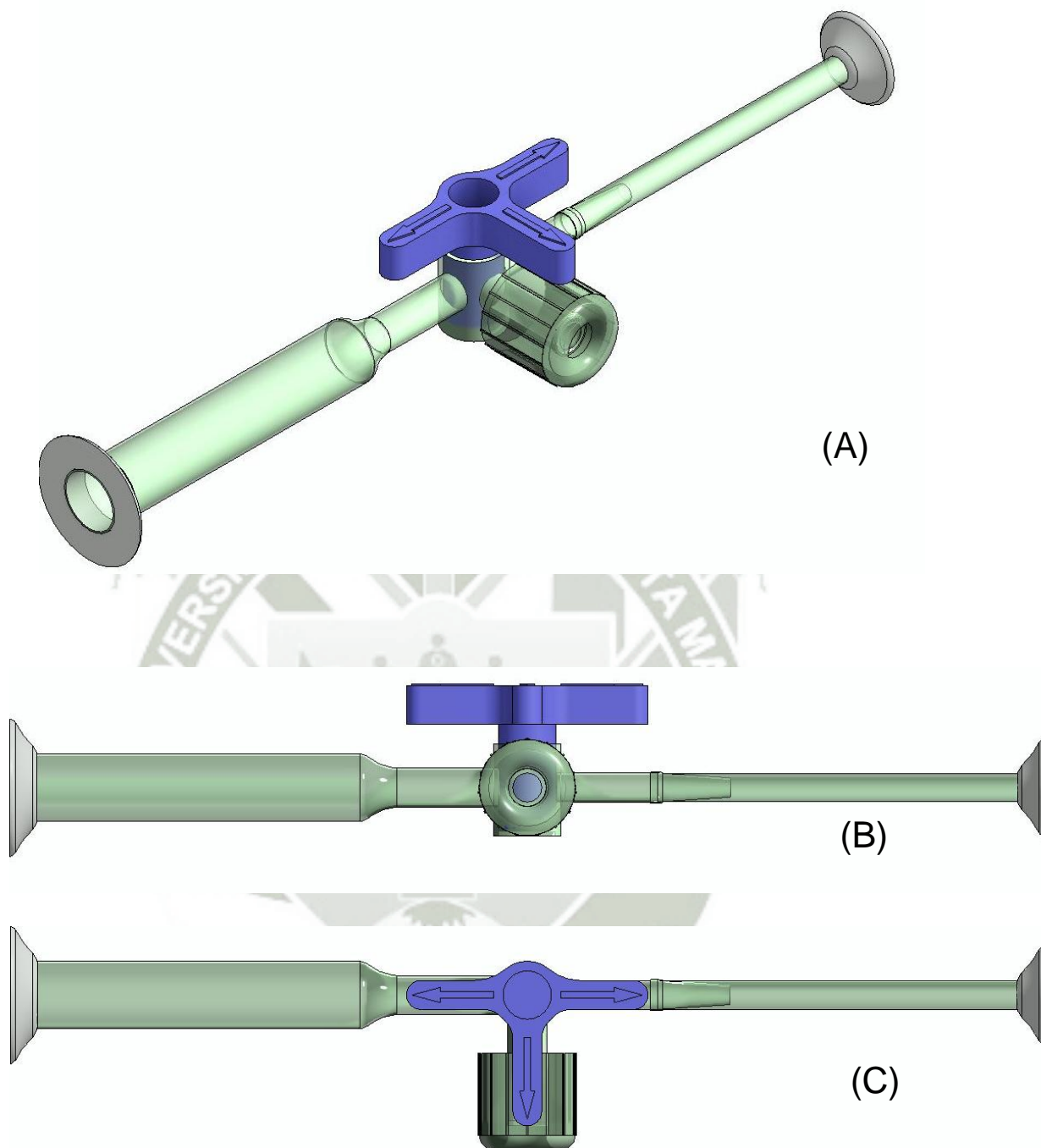


Figura 49. Diseño Lazo electrolítico.

(A) Vista perfil, (B) vista alzado, (C) vista planta

Anexo 7: Diseño Celda ML-MFC

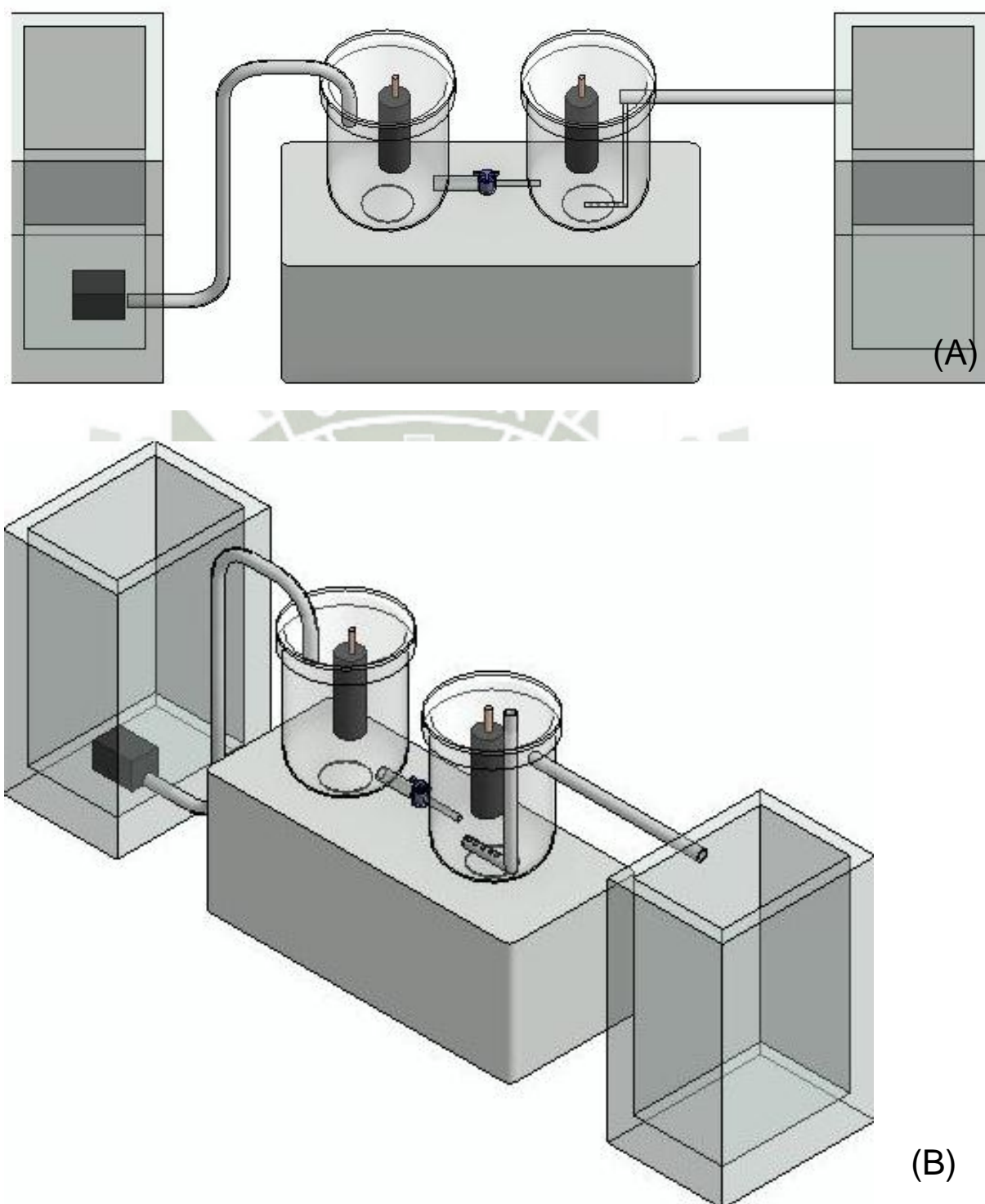


Figura 50. Diseño ML-MFC.

(A) Vista alzado, (B) Vista perfil

Anexo 8: Diseño celda MFC

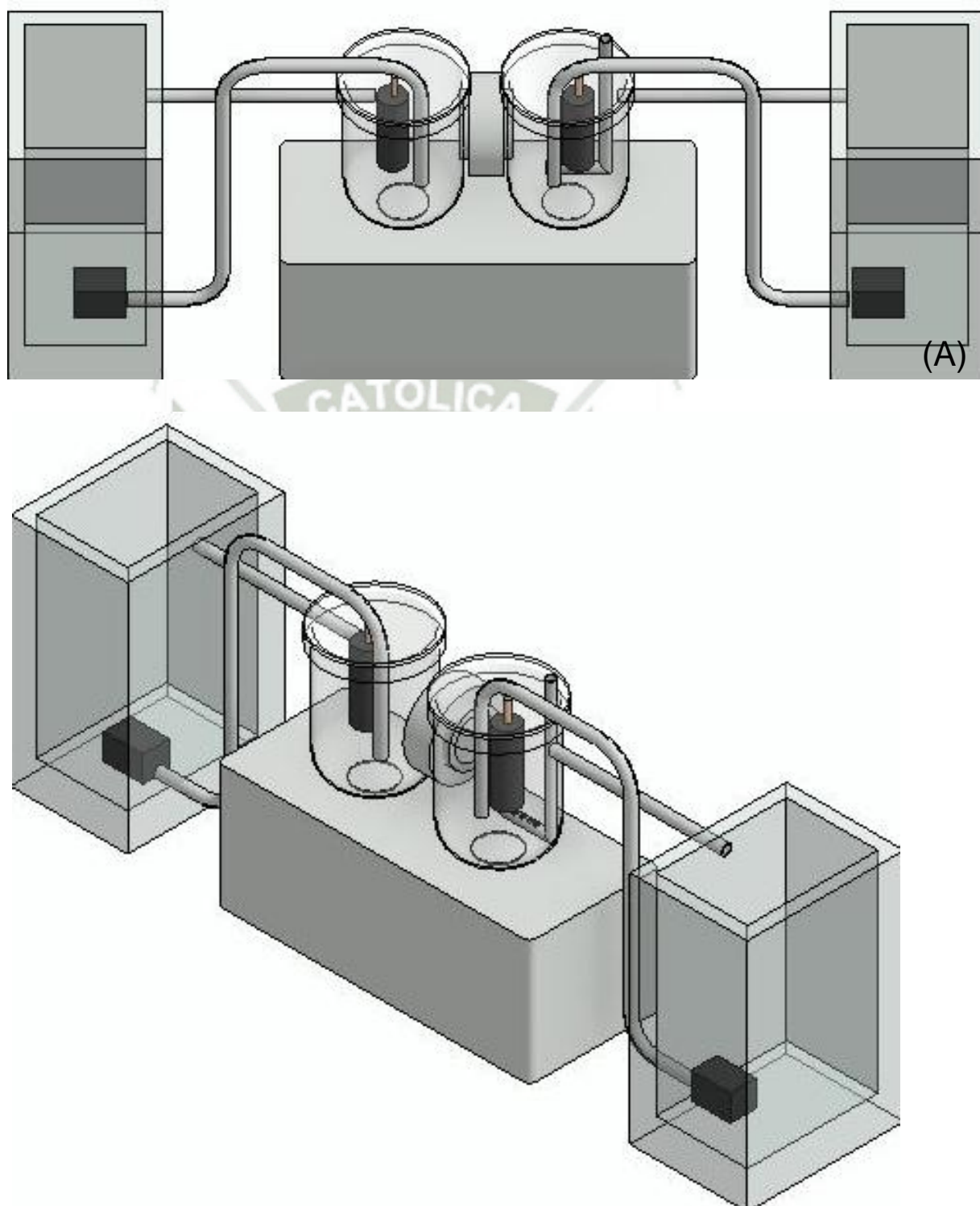


Figura 51. Diseño MFC

(A) Vista alzado, (B) Vista perfil