

IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A
ESCALA LABORATORIO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

MARÍA ALEJANDRA BERMUDEZ MONTAÑO
ERIKA DAYANA BERNAL ARAGÓN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A
ESCALA LABORATORIO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

MARÍA ALEJANDRA BERMUDEZ MONTAÑO
ERIKA DAYANA BERNAL ARAGÓN

Proyecto de investigación para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
ANDREA CRISTINA LACHE MUÑOZ
Ingeniera Química

Codirector
ADRIANA PÁEZ MORALES
Microbióloga

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Marzo 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrector Académico y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano General Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director de Investigaciones

Ing. Armando Fernández

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor

DEDICATORIA

En primer lugar dedico este trabajo de investigación a Dios, porque ha labrado para mí un camino lleno de aprendizaje que me ha permitido llegar hasta este punto, a mi mamá Nidya Montaña porque me ha enseñado que con determinación se llega lejos, su apoyo y amor incondicional me permitieron lograr mis objetivos, a mi papá Alberto Bermúdez porque gracias a él he adquirido disciplina y constancia, sus palabras siempre serán un pilar para mí, a mi hermana Paula por apoyarme siempre que lo he necesitado y brindarme un cariño excepcional, a mi hermana Nicol por ser mi fuerza cuando lo necesito, escucharme y entenderme siempre. Por último, dedico este trabajo a mi amiga Erika Bernal, porque con dedicación logramos culminar una etapa más de nuestra vida.

María Alejandra Bermúdez Montaña.

Quiero dedicar este proyecto de investigación inicialmente a Dios, porque en él siempre encontré un apoyo emocional y me permitió guiar mi camino para poder culminar una etapa más en mi vida, a mis padres por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento las cuales nunca me dejaron desfallecer durante este camino, a mi madre por su amor y comprensión y por siempre inculcarme que la perseverancia es un camino al éxito, a mi padre por enseñarme que a pesar que el camino sea difícil con esfuerzo y dedicación siempre encontraré una solución para lograr cumplir mis metas, a mi hermana por ser mi ejemplo a seguir y apoyarme en cada decisión y paso de mi vida, a mi novio por siempre tener palabras de aliento, ser mi apoyo incondicional y mi fuerza cuando más lo he necesitado y finalmente a mi compañera y amiga Alejandra Bermúdez, por siempre tener fe y nunca desfallecer durante este camino.

Erika Dayana Bernal Aragón

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La ingeniería Química Andrea Lache Muñoz, directora del proyecto de investigación por guiarnos en el desarrollo de la investigación para llegar a cumplir los objetivos.

La microbióloga Adriana Páez Morales, codirectora del proyecto de investigación por su apoyo brindado

A los docentes de la Fundación Universidad de América que nos acompañaron en la formación académica durante estos 5 años, ayudándonos a crecer personal y profesionalmente

A nuestros compañeros y amigos por acompañarnos en este camino

Por último, pero no menos importante, a nuestros padres por el apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su amor.

Infinitas gracias...

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	26
1. GENERALIDADES TEÓRICAS	27
1.1 ELECTROQUÍMICA	27
1.1.1 Celdas electroquímicas	27
1.1.2 Reacciones de óxido-reducción	29
1.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE	29
1.3 CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (CCM)	31
1.4 MICROORGANISMOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (CCM)	33
1.4.1 Microorganismos electrogénicos	33
1.4.2 Métodos de obtención de energía de los microorganismos	34
1.4.3 Rutas metabólicas de los microorganismos	34
1.4.4 Transportadores de electrones	34
1.4.5 Métodos de conservación de energía	35
1.4.6 Transferencia de electrones en microorganismos	35
1.4.7 Microorganismos en el tratamiento de aguas residuales	36
1.5 CONFIGURACIONES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (CCM)	36
1.6 ELECTRODOS EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA	40
1.6.1 Criterios para la selección de un electrodo	41
1.6.1.1 Porosidad	41
1.6.1.2 Área de contacto	41
1.6.1.3 Conductividad	42
1.6.1.5 Resistividad	42
1.6.2 Ánodo	43
1.6.3 Cátodo	44
1.7 PUENTE DE INTERCAMBIO IÓNICO	47
1.7.1 Características del puente de intercambio iónico	47
1.7.2 Material del puente de intercambio iónico	51
1.8 EFECTOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	53
1.8.1 Variables de proceso	53
2. METODOLOGÍA	56
2.1 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LAS POSIBLES CONFIGURACIONES, OPERACIÓN Y MATERIALES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA	56
2.1.1 Estudio de las configuraciones y selección de una CCM	56
2.1.2 Análisis de las condiciones de operación de una CCM	56
2.1.2.1 pH	57
2.1.2.2 Temperatura	57

2.1.2.3	Sustrato	57
2.1.2.4	Potencial de óxido reducción	58
2.1.3	Material de las cámaras	58
2.1.3.1	Propiedades eléctricas	58
2.1.3.2	Resistencia a la temperatura	59
2.1.3.3	Formación de Biopelícula	59
2.1.4	Material de los electrodos	59
2.1.4.1	Generación de energía eléctrica	60
2.1.4.2	Propiedades eléctricas	60
2.1.4.3	Resistencia a la temperatura	60
2.1.5	Material puente de intercambio iónico	61
2.1.5.1	Composición	61
2.1.5.2	Propiedades del material del puente de intercambio	61
2.1.6	Dimensiones de una CCM	61
2.1.6.1	Volumen de cámaras	62
2.1.6.2	Área y volumen de los electrodos	62
2.1.6.3	Área de contacto del puente de intercambio	62
2.1.6.4	Longitud el puente de intercambio	62
2.2	INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA EN LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA Y ENSAMBLE	62
2.2.1	Selección de la instrumentación empleada para el control de las variables de proceso	62
2.2.1.1	Sensor de temperatura	63
2.2.1.2	pH-metro	63
2.2.1.3	Multímetro	63
2.2.2	Software de instrumentación virtual	63
2.2.3	Condiciones de uso y ensamble de la celda de combustible microbiana	63
2.3	EFICIENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA Y EVALUACIÓN DEL DQO	64
2.3.1	Estimación de parámetros para la evaluación de producción de energía eléctrica	64
2.3.2	Análisis de resultados de la producción de energía eléctrica	65
2.3.3	Análisis de DQO	65
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
3.1	CONFIGURACIÓN, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN SELECCIONADAS	67
3.1.1	Selección de la configuración de la CCM	67
3.1.2	Condiciones de operación de una CCM	69
3.1.2.1	pH	70
3.1.2.2	Temperatura	71
3.1.2.3	Sustrato	71
3.1.2.4	Potencial de óxido reducción	72
3.1.3	Material de las cámaras	72
3.1.3.1	Propiedades eléctricas	73

3.1.3.2 Resistencia a altas temperaturas	73
3.1.3.3 Formación de Biopelícula	74
3.1.4 Material de los electrodos	75
3.1.4.1 Generación de energía eléctrica	75
3.1.4.2 Propiedades eléctricas	77
3.1.4.3 Resistencia a la temperatura	79
3.1.5 Material puente de intercambio iónico	79
3.1.5.1 Composición	80
3.1.5.2 Propiedades del material del puente de intercambio	81
3.1.6 Dimensiones de una CCM	83
3.1.6.1 Volumen de cámaras	84
3.1.6.2 Área y volumen de los electrodos	84
3.1.6.3 Área de contacto del puente de intercambio de protones	86
3.1.6.4 Longitud puente de intercambio protónico	87
3.2 INSTRUMENTACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA	88
3.2.1 Instrumentación empleada para el control de las variables de proceso	88
3.2.1.1 Sensor de temperatura	88
3.2.1.2 pH-metro	91
3.2.1.3 Multímetro	91
3.2.2 Software de instrumentación virtual	91
3.2.3 Condiciones de uso y ensamble de la celda de combustible microbiana	95
3.3 EFICIENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA Y EVALUACIÓN DEL DQO	98
3.3.1 Producción de energía eléctrica de CCM implementada	98
3.3.2 Análisis de resultados de la producción de energía	102
3.3.3 Análisis de DQO El análisis DQO	105
4. CONCLUSIONES	108
5. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFIA	112
ANEXOS	120

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de celda de combustible	31
Tabla 2. Tipos de configuraciones de CCM usadas a escala laboratorio	67
Tabla 3. Ventajas y desventajas de las CCM más usadas a escala laboratorio	69
Tabla 4. Componentes de la tripticasa de soya	71
Tabla 5. Propiedades eléctricas de materiales para la cámara de una CCM	73
Tabla 6. Propiedades térmicas de materiales para la cámara de una CCM	73
Tabla 7. Propiedades eléctricas de los materiales carbonosos	78
Tabla 8. Tipos de sensores de temperatura	89
<i>Tabla 9. Resultados experimentales de la Escherichia coli</i>	100
Tabla 10. Resultados experimentales de las <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	100
Tabla 11. Resultados de los parámetros de producción de energía en la CCM para la <i>Escherichia coli</i>	102
Tabla 12. Resultados de los parámetros de producción de energía en la CCM para las <i>Pseudomonas Aeruginosa</i>	103
Tabla 13. Análisis DQO para las tres muestras del proceso	106
Tabla 14. Reducción de la materia orgánica presente en agua residual sintética	106
Tabla 15. Resultados de investigaciones realizadas en CCM y % de reducción del DQO	107

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Relación del material del electrodo con la generación de energía eléctrica según los artículos consultados.	76
Gráfico 2. Relación entre materiales carbonos y densidad de potencia alcanzada (mW/m^2) según lo reportado en referentes bibliográficos	79
Gráfico 3. Máxima generación de voltaje (mV) en materiales utilizados en el intercambio iónico.	83
Gráfico 4. Relación entre la densidad de potencia (mW/cm^2) y el área superficial del electrodo (cm^2)	85
Gráfico 5. Comportamiento del voltaje en un tiempo de 30 horas para las bacterias estudiadas.	101
Gráfico 6. Generación de energía eléctrica para la <i>Escherichia coli</i> en los dos casos estudiado.	104
Gráfico 7. Generación de energía eléctrica para las <i>Pseudomonas aeruginosa</i> en los dos casos estudiado.	105

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama general de una celda electroquímica	28
Figura 2. Celda de combustible microbiana de dos cámaras	37
Figura 3. Celda de combustible microbiana de una cámara	38
Figura 4. Celda de combustible microbiana con sistema de flujo ascendente	39
Figura 5. Celda de combustible microbiana apilada	40
Figura 6. Diferentes electrodos-ánodo carbonosos	43
Figura 7. Reacción en el cátodo en un CCM	45
Figura 8. Tipos de cátodos	46
Figura 9. Clasificación de las membranas según su naturaleza	48
Figura 10. Clasificación de las membranas según su estructura	48
Figura 11. Clasificación de las membranas según el tipo de transporte	49
Figura 12. Polímeros que se utilizan en la fabricación de membranas de intercambio iónico	51
Figura 13. Estructura química del Nafion	81
Figura 14. Estructura química del agar	82
Figura 15. Longitud del puente de intercambio protónico	88
Figura 16. Panel frontal medición variables voltaje y temperatura	92
Figura 17. Diagrama de bloques medición de la variable temperatura	93
Figura 18. Conexión sensor de temperatura con el Hardware Arduino	94
Figura 19. Comportamiento de la temperatura en la generación de energía eléctrica para <i>Escherichia coli</i>	95

Figura 20. Comportamiento de la temperatura en la generación de energía eléctrica para las *Pseudomonas aeruginosa*

96

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Conductividad eléctrica	42
Ecuación 2. Resistencia eléctrica	42
Ecuación 3. Capacidad de intercambio de iones (IEC)	52
Ecuación 4. Conductividad	52
Ecuación 5. Voltaje	54
Ecuación 6. Intensidad de corriente eléctrica	54
Ecuación 7. Densidad de corriente	55
Ecuación 8. Potencia	55
Ecuación 9. Densidad de potencia	55
Ecuación 10. Voltaje	64
Ecuación 11. Intensidad de corriente eléctrica	64
Ecuación 12. Densidad de corriente	64
Ecuación 13. Potencia	65
Ecuación 14. Densidad de potencia	65
Ecuación 15. Potencia máxima de la celda en función del área de los electrodos y el área del puente de intercambio	86

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Ensamble de la CCM	97

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Manual instrucciones y condiciones de uso para la celda de combustible microbiana implementada	121
Anexo B. Plano CCM llevados a cabo en el Software CAD, Autodesk Inventor Professional 2017 bajo el estándar de las normas ISO para el dibujo técnico	12531
Anexo C. Resultados monitoreo de temperatura para las cepas seleccionadas con el Software de instrumentación virtual	139
Anexo D. Costo construcción celda de combustible microbiana	141
Anexo E. Análisis DQO	142

LISTA DE SIGLAS

AMI	Puente de intercambio aniónico
ATP	Adenosin trifosfato
CCM	Celda de combustible microbiana
CMI	Puente de intercambio catiónico
CNT	Nanotubos de carbono
DQO	Demanda química de oxígeno
FAD	Flavín adenín dinucleótido
FADH ₂	Flavín adenín dinucleótido en su forma reducida
H ⁺	Hidrogenión, protón o catión hidrógeno
IEC	Capacidad de intercambio de iones
IEM	Puentes de intercambio iónico (Ion exchange membrane)
NAD	Nicotinamida adenina dinucleótido
NADP	Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato
ORP	Potencial óxido-reducción
pH	Concentración de iones de hidrógeno
REDOX	Reacciones de oxidación-reducción
seg	Segundos

LISTA DE SIMBOLOS

A	Amperios
A_{an}	Área superficial del electrodo del ánodo
A_{cat}	Área superficial del electrodo del cátodo
A_{PEM}	Área de contacto del puente de intercambio
a	Área superficial del electrodo
a^*	Volumen agregado de valorante en el punto equivalente
b^*	Concentración molar de valorante
C	Culombios
cm^2	Centímetro cuadrado
E	Voltaje
g	Gramos
I	Intensidad de corriente eléctrica
J	Densidad de corriente
l	Longitud
m^2	Metro cuadrado
m^*	Membrana seca en peso
mA	Miliamperios
mmol	Milimol
mV	Milivoltio
mW	Miliwatts
P	Potencia

P^*	Densidad de potencia
Q	Carga eléctrica
R_{ext}	Resistencia externa
r	Distancia entre electrodos, detección de potenciales y resistencia a la membrana
S	Siemens
S	Sección transversal
t	Tiempo
V	Voltios
W	Watts
Å	Angstrom
σ	Conductividad eléctrica
ρ	Resistividad eléctrica

GLOSARIO

AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA: son las procedentes de los hogares, tales como residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado, de igual forma las instalaciones en las cuales se desarrollen actividades industriales o de servicios que correspondan a servicios sanitarios y de aseo personal.

AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA: procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituye en aguas residuales domésticas.

ANAEROBIOSIS: proceso metabólico que no requiere de oxígeno (O_2) para su desarrollo, en este caso su donador de electrones serán nitratos, sulfatos, azufre y dióxido de carbono.

ANÓDO: electrodo el cual se ubica en la cámara anódica y se lleva a cabo la reacción de oxidación.

BIOCATODO: electrodo como una opción de reemplazar los electrodos catódicos tradicionales, ya que son menos costosos e impulsan el proceso de generación de energía eléctrica.

BIOPELÍCULA: las biopelícula son organizaciones microbianas compuestas por microorganismos que se adhieren a diferentes superficies gracias a la secreción de un ex polímero.

BIOTECNOLOGÍA: aplicación de organismos, sistemas o procesos biológicos a procesos industriales para la producción de servicios, es decir, para el beneficio humano.

CÁTODO: electrodo ubicado en la cámara catódica, en el cual se efectúa la reducción del proceso.

CELDA ELECTROQUÍMICA: dispositivos donde se obtiene energía eléctrica a partir de reacciones químicas, en especial reacciones de óxido – reducción.

CELDA DE COMBUSTIBLE: celda electroquímica que genera energía en forma de electricidad y algunas veces en forma de calor.

CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA: dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química que se encuentra en un sustrato en energía eléctrica.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual.

DENSIDAD DE CORRIENTE: cantidad de carga que pasa por una unidad de tiempo.

ELECTROQUÍMICA: es el estudio de las reacciones químicas que dan origen a la producción de una corriente eléctrica.

ESTERILIZACIÓN: en microbiología se llama esterilización a la eliminación de todos los microorganismos que contiene un objeto, equipo o sustancia, de tal forma que no se pueda contaminar nuevamente.

MEMBRANA: barrera semipermeable que selecciona lo que entra y sale de una célula.

PUENTE SALINO: dispositivo que conecta las dos celdas, es un medio iónico con una barrera semipermeable en cada uno de sus extremos; por medio de estas barreras pueden pasar pequeñas moléculas e iones.

REACCIONES REDOX: proceso químico en el cual una sustancia pierde electrones o los libera (oxida) para que otra sustancia los acepte o gane electrones (reduce).

RESUMEN

Las celdas de combustible microbiana son una tecnología emergente para la producción de electricidad y de forma simultánea la reducción de carga orgánica (DQO) en aguas residuales, éste tipo de tecnología se encuentra aún en estudios a escala laboratorio, ya que representa una oportunidad en el desarrollo de las energías alternativas, debido al volumen disponible de aguas residuales en Colombia.

Para implementar éste tipo de tecnología existen diferentes componentes y variables que deben ser estudiadas para garantizar la generación de energía eléctrica y disminución de carga orgánica del agua residual. El presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño, construcción y puesta en marcha de una celda de combustible microbiana, a través del estudio de las configuraciones más usadas a escala laboratorio, los materiales que la componen y la influencia de ellos en la generación de energía eléctrica y tratamiento de agua residual. Se analizaron las dimensiones de los componentes de una CCM, la composición del puente de intercambio iónico y su relación con la generación de energía, el material de los electrodos y sus características las cuales permitan que el proceso se realice de forma adecuada y permita la continuidad en la investigación. Finalmente se establecieron los parámetros de operación del proceso, identificando un *Software* de instrumentación virtual con el fin de monitorear la variable temperatura y relacionar la influencia de ésta en el crecimiento microbiano y por ende en la generación de energía eléctrica.

Para la producción de energía eléctrica y reducción de carga orgánica del agua residual, se hizo uso de una celda de combustible microbiana de doble cámara tipo H, construida en vidrio, material caracterizado por su baja conductividad eléctrica; mediante el uso de electrodos de placa de grafito y agua residual sintética, tripticasa de soya, se evaluó la capacidad de producción de energía y el porcentaje de reducción de DQO de dos bacterias, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, el proceso se llevó a cabo en condiciones anaerobias facultativas, obteniendo un voltaje promedio de 185,44 mV y 294,17 mV respectivamente, finalmente se obtuvo un porcentaje máximo de reducción de DQO de 12,24% para las *Pseudomonas aeruginosa*.

PALABRAS CLAVE: Celda de combustible microbiana, Barras de grafito, DQO, *LabView*, Puente de intercambio iónico, Voltaje.

INTRODUCCIÓN

El siglo XXI ha traído consigo un alza irreversible en el consumo de energía, debido en gran parte al proceso de industrialización, que ha dado lugar a la implementación de nuevas tecnologías, como base del crecimiento de los países; este desarrollo ha venido de la mano de un mayor incremento de la población.¹ En este orden de ideas el desarrollo industrial y el crecimiento de la población ocasionan un incremento en la demanda de energía. En Colombia, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), ha estimado una proyección de demanda de energía eléctrica de 92.403 GWH para el año 2025 a diferencia del año 2017 la cual obtuvo una proyección de demanda de 72.945 GWH.² Lo anterior es una de las razones por las cuales el aumento del estudio de las energías renovables ha jugado un papel fundamental en los últimos años.

De acuerdo al ministerio de ambiente las hidroeléctricas es la energía sostenible más usada en el país obteniendo un porcentaje de participación del 70%, sin embargo, este tipo de fuente de generación de energía se ha visto afectada por inminentes fenómenos climáticos,³ poniendo así en riesgo el suministro de energía en el país, por consiguiente surge la necesidad de investigar nuevas formas y fuentes de energía, entre las alternativas de las fuentes de energías renovables se encuentra la energía de biomasa la cual aprovecha la materia orgánica proveniente de desechos de seres vivos o actividades urbanas para producir energía, por lo tanto este tipo de fuente de energía son de amplio interés así como las celdas de combustible microbianas las cuales usan la materia orgánica presente en un sustrato para producir energía eléctrica.

Por otra parte, el aumento de las actividades industriales o domesticas generan un incremento en el vertimiento de aguas residuales, afectando la seguridad y sostenibilidad ambiental,⁴ por tal razón es un tema de interés tratar estos efluentes para disminuir el impacto ambiental que ocasionan, para lo cual se realiza un proceso de tratamiento que comprende principalmente tres etapas, entre ellas la

¹ Ministerio de educación Nacional Centro virtual de noticias. Colombia una potencia en energías alternativas. [Electronic]. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>

² Portal XM boletín de movimientos. PRONÓSTICO DE DEMANDA. [Electronic]. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <http://www.xm.com.co/Paginas/Consumo/pronostico-de-demanda.aspx>

³ Minambiente y WWF, unidos por la energía renovable. [Electronic]. Mayo 25, [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/129-noticias-negocios-verdes/2313-minambiente-y-wwf-unidos-por-la-energia-renovable>

⁴ UNESCO and Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). [0]. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/about/>

etapa de tratamiento biológico.⁵ Debido a la gran cantidad de materia orgánica que se encuentra presente en el agua residual y de acuerdo a las últimas investigaciones realizadas a escala laboratorio se consideran las aguas residuales una fuente para la generación de energía.

En respuesta a la mencionada problemática el grupo de investigación de energías alternativas de la Fundación Universidad de América busca implementar una tecnología capaz de reducir o mitigar los problemas mencionados anteriormente, encontrando en las celdas de combustible microbianas una alternativa para la generación de energía eléctrica y reducción de la carga orgánica de aguas residuales, su función principal es convertir la energía química presente en un sustrato a energía eléctrica usando microorganismos, especialmente bacterias.⁶ Estos sistemas no se ha implementado a escala industrial por los bajos niveles de producción de energía eléctrica, por esta razón gran parte de los estudios realizados se han llevado a cabo a escala laboratorio. El estudio de las variables implicadas en el proceso, la configuración de las diferentes celdas de combustible, así como los materiales apropiados para llevar a cabo la correcta combinación y las dimensiones de cada una de las partes que compone las celdas de combustible microbianas (CCM) a escala laboratorio, son las problemáticas que abordará el presente trabajo.

⁵ Condorchem Envitech. Generación de energía a partir de aguas residuales urbanas: Proyecto LIFE SAVING-E. [Electronic]. Marzo 31. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/category/produccion-de-energia/>

⁶ ROMO, Dolly; HURTADO GUTIERREZ, Nelson Humberto y RUIZ,Jaime,O. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. 2012. 17-28 p

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar el diseño mecánico apropiado de una celda de combustible microbiana ajustada a las condiciones y materiales de operación para la producción de energía y disminución del DQO.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las condiciones de operación, posibles configuraciones y materiales apropiados en la construcción de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio.
- Establecer el diseño mecánico a escala laboratorio de una celda de combustible microbiana cuyos materiales e instrumentación permitan el ensamble y la posterior operación de la misma en condiciones adecuadas para la experimentación.
- Evaluar el rendimiento de producción de energía y disminución del DQO de agua residual sintética en la celda de combustible microbiana previamente ensamblada a escala laboratorio

1. GENERALIDADES TEÓRICAS

El funcionamiento de las celdas de combustible principalmente se rige por la electroquímica, en esta rama de la química es donde se lleva a cabo el fenómeno que rodea las celdas de combustible microbianas; inicialmente se estudian los principios básicos, de esta manera se puede comprender el principio de funcionamiento y las características específicas.

1.1 ELECTROQUÍMICA

La electroquímica es una de las ramas de la química dedicada a estudiar la relación entre la energía química y la energía eléctrica, las reacciones químicas son las que eventualmente producen la energía eléctrica, sin embargo, este proceso puede llevarse a cabo a la inversa, es decir, el paso de cierta corriente eléctrica puede generar reacciones químicas.

Entre los principios teóricos de la electroquímica se encuentran las reacciones de óxido-reducción o reacciones electroquímicas, en este tipo de reacciones existe una especie reactiva que se oxida mientras que otra especie reactiva se reduce, esto se lleva a cabo de acuerdo a la interacción entre los electrones y la transferencia de cargas, dependen en su mayoría del tiempo, concentraciones, fases de los componentes involucrados y el comportamiento de la interface y el tipo de celda electroquímica donde tienen lugar.⁷

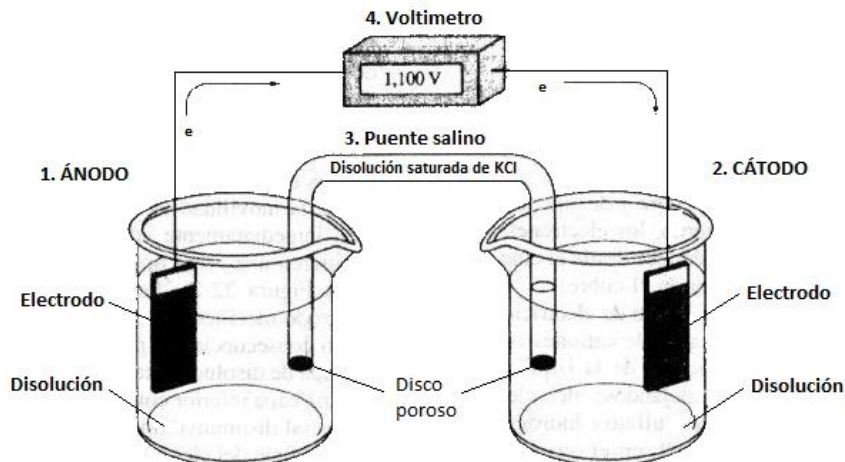
1.1.1 Celdas electroquímicas. Una celda electroquímica es un dispositivo donde se obtiene la energía eléctrica a partir de reacciones químicas o se producen las reacciones químicas a través de la energía eléctrica; en las celdas electroquímicas los electrodos propician dichas reacciones de óxido-reducción, deben ser necesariamente conductores, pues esta característica es la que permite la transferencia de electrones, sin embargo, los materiales semiconductores también han sido implementados en las celdas electroquímicas⁸. Cada electrodo actúa como ánodo o cátodo según el tipo de reacciones que se lleve a cabo en ellos.

La figura 1 muestra un esquema general de lo que es una celda electroquímica, a continuación se describen los componentes característicos:

⁷HEPLER, L. G. Principios de química. Reverté, 1968

⁸ CASTELLAN, G. W. y BASÍN, M. E. C. Físicoquímica. Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.

Figura 1. Diagrama general de una celda electroquímica



Fuente: LOPEZ, Oscar. Celdas Electroquímicas. [0]. Abr 7, [Consultado el 12/11/2017]. Disponible en: <https://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>. Modificada por el autor.

- 1) El ánodo es el electrodo donde se produce la oxidación, es el polo negativo.
- 2) El cátodo es el electrodo donde se produce la reducción, es el polo positivo
- 3) El puente salino permite el contacto eléctrico entre las soluciones electrolíticas.
- 4) El voltímetro o la fuente de poder se encargan de cerrar el circuito permitiendo el paso de los electrones por el sistema.

Como se ha mencionado antes, las celdas electroquímicas pueden generar energía a partir de reacciones químicas o por el contrario generar reacciones químicas a partir de energía eléctrica, el tipo de celda electroquímica permite diferenciar el proceso que se lleva a cabo en el interior⁹:

- **Celda electrolítica:** las reacciones no son espontáneas, no se obtiene energía eléctrica, una fuente de energía externa es quien produce las reacciones químicas al interior de la celda. Éste tipo de celdas trabaja bajo el principio de la electrolisis, este es un proceso de disociación, en esta clasificación la fuente de energía externa funciona como un “generador” de electrones, los electrones siguen el principio de la electroquímica, donde pasan a través del cátodo en el proceso de reducción, se transfieren hacia el ánodo donde se lleva a cabo el proceso de oxidación. Los electrodos se encuentran en una solución denominada electrolito, esta solución puede ser ácida, básica o una sal y tiene como función permitir el transporte de electrones de manera efectiva. La celda electroquímica tipo electrolítica no tiene en su estructura un puente salino como se describe en la figura 1 debido a la presencia del electrolito.

⁹ LOPEZ, Oscar. Celdas Electroquímicas. [Electronic]. Abr 7, [Consultado el 12/11/2017]. Disponible en: <https://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>

• **Celda galvánica:** este tipo de celdas obtienen energía eléctrica a partir de un proceso químico, las reacciones son de tipo espontáneo, no necesita aplicación de una fuente de energía externa. La celda galvánica es también un dispositivo en donde existe transferencia de electrones debido a las reacciones de óxido-reducción, sin embargo, estas reacciones no requieren de una fuente externa de poder, por el contrario, el flujo de electrones que se experimenta es el que genera la corriente eléctrica. ¹⁰En este tipo de celda electroquímica la oxidación se lleva a cabo en la semicelda o cámara anódica el electrodo donde se lleva a cabo este proceso es el ánodo, mientras que en la cámara o semicelda catódica se lleva a cabo la reducción, el electrodo es el cátodo; existe un circuito eléctrico externo donde se transfieren los electrones desde los electrodos mencionados.

1.1.2 Reacciones de óxido-reducción. Las reacciones mencionadas que se llevan a cabo dentro de una celda electroquímica se denominan **reacciones redox**, en este tipo de reacciones se produce una transferencia de electrones entre dos especies¹¹. La sustancia que se oxida es al mismo tiempo la que genera la reducción de otra sustancia, generalmente recibe el nombre de **agente reductor**; la sustancia que se reduce es la que provoca la oxidación de la otra sustancia, ésta recibe el nombre de **agente oxidante**.

1.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible es una adaptación de la celda electroquímica de tipo galvánica descrita con anterioridad, es decir, son un tipo de celda generadora de energía en forma de electricidad y en algunos casos calor; sin embargo, en este tipo de tecnología los reactivos no son parte de la estructura de la celda, es decir, no se encuentran estáticos y son proporcionados por diferentes fuentes externas actuando bajo los principios de la electroquímica.¹²

Las celdas de combustible funcionan en general utilizando hidrógeno y oxígeno, a este tipo de celda se le conoce como celda hidrógeno/oxígeno, en este caso el hidrógeno es el agente reductor, es decir que se oxida en forma de agua. Como las celdas electroquímicas convencionales, este tipo de celda consta de dos electrodos (ánodo y cátodo) y diferentes tipos de electrolitos; la reacción química es de tipo REDOX y la precursora de la generación de energía eléctrica, el hidrógeno se encuentra en el ánodo mientras que el oxígeno en la parte del cátodo, en este caso es la membrana electrolítica la que separa las dos partes de la celda.¹³

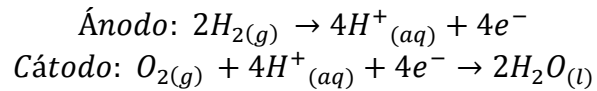
¹⁰ MAYA, C. A. C. Fenómenos químicos. Fondo Editorial Universidad Eafit, 2002.

¹¹ VARGAS, O. D. Reacciones de óxido-reducción. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, 2001.

¹² DE PAULA, J. Química Física. Médica Panamericana, 2007. 947 p. ISBN 9789500612487

¹³ *Ibíd.*, p. 947.

Las reacciones químicas generales que se llevan a cabo en el interior de la celda de combustible hidrógeno/oxígeno se describen a continuación¹⁴:



En la celda de combustible, el hidrógeno se encuentra en forma de gas y el oxígeno es suministrado por el aire; En el ánodo es donde el hidrógeno es ionizado por medio de una oxidación, donde queda en forma de protón, al llevar a cabo este proceso se libera simultáneamente un electrón que viaja hacia el cátodo. El protón por otra parte, atraviesa el electrolito o puente salino hacia el cátodo, En el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción, es decir que el oxígeno gana el electrón perdido por el hidrógeno formando agua junto con el protón que ha atravesado el electrolito. Finalmente, en una celda de combustible se genera agua, energía y en la mayor parte de las ocasiones, calor en forma de energía térmica. ¹⁵. Según dice Cano Ulises “en teoría, cada molécula de hidrógeno gas producirá dos electrones libres y junto con una átomo de oxígeno reducido se generará una molécula de agua”¹⁶

Ahora bien, las celdas de combustible tienen diferentes clasificaciones de acuerdo al material empleado tanto para los electrodos, electrolito, el combustible, la configuración, la temperatura, entre otros. En la **tabla 1** se encuentran los diferentes tipos de celdas de acuerdo al electrolito empleado y según lo reportado en la bibliografía.

¹⁴ *Ibíd.*, p. 947.

¹⁵ CANO, Ulises. Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. [Electronic]:México: 1999. 208-214 p.

¹⁶ *Ibíd.*, p. 209.

Tabla 1.Tipos de celda de combustible

Tipo de celda de combustible	Electrolito empleado
PEM	Polímero solido
DMFC	Polímero solido
AFC	Solución de hidróxido de potasio en agua
PAFC	Ácido fosfórico líquido
MCFC	Carbonatos alcalinos sobre una matriz cerámica
SOFC	Solido cerámico
Pila de combustible de hidruros metálicos	Solución acuosa alcalina
Pila de combustible electro-galvánica	Solución acuosa alcalina
Pila de combustible de ácido fórmico	Membrana polimérica (ionómero)
Batería de zinc—aire	Solución acuosa alcalina
<i>Pila de combustible microbiana</i>	<i>Membrana de polímero o ácido húmico</i>
Pila de combustible regenerativa	Membrana polimérica (ionómero)
Pila de combustible boro hidruro	Solución acuosa alcalina
Pila de combustible de metanol reformado	Membrana polimérica (ionómero)
Pila de combustible de etanol	Membrana polimérica (ionómero)
Pila de combustible REDOX	Electrolitos líquidos y membrana polimérica (ionómero)
Pila d combustible cerámica protónica	Conductor de H ⁺ de óxido cerámico
Pila de combustible de carbono	Varios diferentes
Bio-pilas de combustible enzimáticas	Compatible con la enzima
Pila de combustible de magnesio-aire	Agua salada

Fuentes: APPLEBY,A. J. FOULKES,F. R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 2004. Anonymous. Fuel cell technology handbook. En: CHOICE REVIEWS ONLINE. Jul 1,.,vol. 40, no. 11, p. 635

De acuerdo a la tabla 1, cuando se menciona **pila** hace referencia a la conexión de varias celdas de combustible, considerando la **celda** como una unidad del sistema.

1.3 CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (CCM)

De acuerdo a lo descrito anteriormente, las celdas de combustible tienen distintas clasificaciones, una de ellas, *celda de combustible microbiana (CCM)*, a continuación se describirá el principio que utiliza y la diferencia que tiene sobre las celdas de combustible convencionales.

Las celdas de combustible microbianas son un dispositivo bio-electroquímico capaz de realizar la conversión espontánea o única de la biomasa en electricidad, este proceso se realiza basándose en la actividad metabólica de los microorganismos.¹⁷

Estos dispositivos utilizan microorganismos, en especial bacterias, para degradar u oxidar la materia orgánica, los microorganismos producen electrones que viajan a través de una serie de enzimas respiratorias en la célula, de este modo se genera energía en la célula en forma de ATP. Los electrones se liberan y son recibidos por un aceptor terminal de electrones para posteriormente ser reducidos¹⁸.

Teniendo en cuenta el mecanismo de transferencia de electrones las CCM se pueden clasificar en tres grupos:

Primera generación: Las especies bacterianas que no pueden liberar fácilmente electrones y necesitan de sustancias artificiales y/o naturales para llevar a cabo la transferencia de electrones se encuentran en este grupo de CCM; las sustancias a utilizar para llevar a cabo dicha transferencia de electrones se denominan mediadores REDOX, (rojo neutro, azul de metileno, tionina)¹⁹.

Segunda generación: En este tipo de celda los electrones son transferidos por medio de mediadores naturales de sulfato/sulfuro, en este caso el sulfuro es compatible químicamente con el ánodo, oxidándose en la superficie del ánodo y generando electrones y sulfato²⁰.

Tercera generación: Hoy en día se conoce que algunas bacterias son capaces de transferir electrones exógenamente al aceptor terminal de electrones, estos microorganismos se conocen como microorganismos electrogénicos, debido a que son capaces de transferir electrones sin uso de un mediador y pueden ser utilizados en las celdas de combustible microbiana²¹. Este tipo de bacterias puede formar una mono capa en la superficie del electrodo del ánodo usándola como el aceptor de electrones.²²

La estructura y composición de una CCM es similar a una celda de combustible convencional, este tipo de celdas está compuesta por una cámara anódica, cámara catódica, electrodos (ánodo y cátodo) y un puente de intercambio que permite el transporte de los iones a través del sistema. Sin embargo, las celdas de combustible microbiana se diferencian de las celdas de combustible convencionales por

¹⁷ SONAWANE, Jayesh M., et al. Recent advances in the development and utilization of modern anode materials for high performance microbial fuel cells. [1]:2017. 558-576

¹⁸ LOGAN, Bruce E. Microbial fuel cells. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.

¹⁹ IEROPOULOS, Ioannis A., et al. Comparative study of three types of microbial fuel cell. [1]:2005. 238-245

²⁰ *Ibíd.*, p. 239.

²¹ ESTEVE-NEZ, Abraham. Bacterias productoras de electricidad.

²² IEROPOULOS, Ioannis A, Op. cit., p. 239

aprovechar la acción metabólica de los microorganismos en la generación de la energía eléctrica²³. Los microorganismos llevan a cabo las distintas rutas metabólicas en la **cámara anódica**, en las CCM el proceso de oxidación se lleva a cabo en el electrodo de la cámara (ánodo), dicho proceso generalmente se realiza en condiciones anaerobias²⁴ de acuerdo a la clasificación según el potencial de óxido-reducción para el crecimiento óptimo de las cepas.

Igualmente, las celdas de combustible microbiana cuentan con un compartimiento o cámara catódica, cátodo y puente de intercambio que cumplen con la misma función en el proceso de una celda de combustible convencional²⁵.

1.4 MICROORGANISMOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (CCM)

Una vez se han determinado todos los componentes que conforman una CCM en cuanto a su estructura y configuración se estudia el proceso dentro de la celda, los microorganismos capaces de producir electricidad son la primera parte del proceso, estos microorganismos cumplen con ciertas características que les permiten llevar a cabo la generación de electrones que posteriormente se verá convertida en energía eléctrica.

1.4.1 Microorganismos electrogénicos. Anteriormente se sabía que los microorganismos con actividad eléctrica necesitaban el uso de mediadores redox, un mediador es un compuesto que entra a la célula acepta electrones de varios transportadores y sale de la célula en estado reducido logrando donar los electrones al ánodo, estos compuestos generalmente de naturaleza metal-orgánica o colorantes, por ejemplo rojo neutro, azul de metileno y tionina, se utilizaban para aumentar la corriente y potencia, sin embargo los microorganismos electrogénicos son aquellos capaces de transferir electrones al ánodo en ausencia de estos mediadores²⁶.

Se distinguen dos tipos de bacterias electrogénicas, en primer lugar están las que pueden producir su propio mediador redox y posteriormente ser secretadas al medio

²³ SCOTT,K. 1 - an Introduction to Microbial Fuel Cells. En: SCOTT,Keith andYU,Eileen Hao eds. Microbial Electrochemical and Fuel Cells. Boston: Woodhead Publishing, 2016. 3-27 p.

²⁴ DUMITRU,A. y SCOTT,K. 4 - Anode Materials for Microbial Fuel Cells. En: SCOTT,Keith and YU,Eileen Hao eds. Microbial Electrochemical and Fuel Cells. Boston: Woodhead Publishing, 2016. 117-152 p.

²⁵ ROMO, Dolly; HURTADO GUTIERREZ, Nelson Humberto y RUIZ,Jaime,O. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. 2012. 17-28 p

²⁶ ESTEVE-NEZ,Abraham, Op. cit.

reaccionando con el electrodo, y los que interactúan de forma directa con el electrodo sin la presencia de mediadores solubles.²⁷

1.4.2 Métodos de obtención de energía de los microorganismos. Los microorganismos desempeñan una función clave en el área energética; pueden obtener energía por dos métodos: por medio de compuestos químicos, ya sean orgánicos, inorgánicos o por energía proveniente de la luz²⁸.

Los organismos que obtienen energía de compuestos orgánicos se denominan *quimioorganotrofos* y la energía es obtenida por la oxidación (pérdida de electrones) del compuesto, conservando esta energía en la célula en forma de ATP, estos organismos pueden obtener la energía en ausencia de oxígeno, anaerobios, o en presencia del mismo, aerobios, por otra parte los organismos que obtienen energía de compuestos inorgánicos se denominan *quimiolitotróficos* y finalmente los organismos que obtienen energía (ATP) por la luz solar se denominan *microorganismos fototróficos*²⁹.

1.4.3 Rutas metabólicas de los microorganismos. El metabolismo se refiere a la totalidad de las reacciones químicas que se producen en un organismo vivo y este se puede dividir en dos clases de reacciones químicas: las que liberan energía y las que consumen energía. Las reacciones químicas que consumen energía se denominan *anabólicas*, estas reacciones dan lugar a la formación de moléculas orgánicas complejas a partir de moléculas simples, por otra parte las reacciones que liberan energía se denominan *catabólicas*, estas degradan compuestos orgánicos complejos en compuestos más simples, las reacciones catabólicas generalmente son exergónicas, producen más energía de la que consumen, por ende el transporte de electrones generado en una celda de combustible microbiana generalmente se realiza por rutas catabólicas³⁰.

1.4.4 Transportadores de electrones. La transferencia de electrones en reacciones de óxido-reducción de la célula necesita de uno o más intermediarios para su funcionamiento, dichos intermediarios son los transportadores de electrones y consisten en una secuencia de moléculas transportadoras capaces de generar reacciones de oxidación y reducción; tras el paso de los electrones a lo largo de la cadena transportadora de electrones se produce una liberación gradual de energía que es utilizada para la generación de ATP. En las células procariontas la cadena transportadora está ubicada en la membrana plasmática^{31,32}.

²⁷ FALCON,A.; LOZANO,J. E. andJUREZ,K. Bioelectricidad. En: BioTecnología. vol. 13, no. 3, p. 62-78

²⁸ MADIGAN,M. T., et al. Brock biología de los microorganismos. Pearson Educación, 2004. p. 28

²⁹ *Ibíd.*, p. 28.

³⁰ TORTORA, Gerard J.; FUNKE,Berdell R. y CASE,Christine L. Introducción a la Microbiología. Ed. Mdica Panamericana, 2007.

³¹ MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M; PARKER, Jack. Brock. Op. cit., p. 28

³² TORTORA, Gerard J.; FUNKE, Berdell R.; CASE, Christine L. Op. cit.

Los transportadores de electrones se dividen principalmente en dos clases, los que se difunden libremente y los que están unidos a enzimas y anclados a la membrana citoplasmática, la primera clase incluyen coenzimas nicotinamida adenín dinucleótido (NAD⁺) y NAD – fosfato (NADP⁺), estas coenzimas actúan como transportadoras de átomos de hidrógeno y transferencia de los mismos a la siguiente molécula de la cadena transportadora.³³

1.4.5 Métodos de conservación de energía. La conservación de energía de los microorganismos que utilizan sustancias químicas (orgánicas e inorgánicas) como donadores de electrones en el metabolismo energético, se puede obtener por medio de dos métodos cuyo resultado final será la síntesis de ATP para ambos casos; en primer lugar, está la fermentación en la cual el proceso de óxido-reducción ocurre en ausencia de aceptores finales de electrones. La producción de ATP en el método de fermentación se puede dar por fosforilación a nivel sustrato, en donde la generación de ATP se da por el catabolismo de la sustancia orgánica y por fosforilación oxidativa que produce ATP por medio de fuerzas motriz de protones.

El segundo método para conservar energía es la respiración que a diferencia de la fermentación si requiere de un aceptor final de electrones, la respiración puede ser aerobia en la cual el aceptor final de electrones es el oxígeno molecular (O₂) o la respiración anaerobia donde el aceptor final generalmente son sustancias inorgánicas como por ejemplo nitritos, sulfatos y carbonatos³⁴.

1.4.6 Transferencia de electrones en microorganismos. Los microorganismos no tienen la capacidad de transportar electrones directamente al electrodo (ánodo), en su mayoría, debido a que la composición externa de la célula posee estructuras no conductoras que impide el paso de los electrones, además la cadena transportadora de electrones en bacterias puede ser distinta porque una misma bacteria puede poseer varios tipos de cadenas transportadoras, sin embargo, el objetivo central es el mismo, liberación de energía. La transferencia de electrones se basa en los siguientes aspectos:

Las moléculas que representan el dador primario de electrones en la cadena de transporte son la nicotinamida adenina dinucleótido (NAD⁺), nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP⁺) y flavin adenín dinucleótido (FAD, forma oxidada, y FADH₂, forma reducida, cuando acepta dos átomos de hidrógeno cada uno con un par de electrones y protones) las cuales son provenientes del ciclo de Krebs o rutas análogas a este ciclo y se encuentran en forma reducida^{35,36}.

³³ MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M; PARKER, Jack. Brock. Op. cit., p. 28

³⁴ MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M; PARKER, Jack. Brock. Op. cit., p. 28

³⁵ SALAZAR, Maria del Socorro. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE BIOCELDAS. [Electronic]:México: 1-81

³⁶ TORTORA, Gerard J.; FUNKE, Berdell R.; CASE, Christine L. Op. cit.

Como se mencionó anteriormente los transportadores son los encargados de llevar los electrones desde un donador primario hasta el aceptor final, los transportadores incluyen flavoproteínas, que poseen la capacidad de realizar reacciones de oxidación y reducción, proteínas hierro/azufre y una serie de quinonas y citocromos.³⁷

Posteriormente el electrón abandona las flavoproteínas y pasa a otra quinona en la bicapa lipídica, cuando la quinona se reduce se forma quinol, un buen reductor, y será un donador de electrones, por medio del citocromo c el electrón pasa de la cadena de transporte al periplasma, el citocromo c es el encargado de bombear los electrones hacia el ánodo y a su vez la transferencia de electrones al citocromo bc³⁸.

Finalmente la cadena transportadora de electrones provoca un bombeo de protones fuera de la membrana el cual genera un potencial electroquímico de protones, los protones pueden difundirse a través de canales proteínicos los cuales contienen un complejo enzimático situado en la membrana llamado ATP – sintetasa para la producción de ATP ^{39,40}.

1.4.7 Microorganismos en el tratamiento de aguas residuales. El aumento de la población mundial genera un aumento en el volumen de aguas residuales ya sean domésticas o industriales, las cuales contienen, excrementos humanos, agua de desecho, residuos industriales y aguas superficiales de arrastre, donde todos estos residuos comúnmente contienen sustancias orgánicas e inorgánicas y a su vez microorganismos patógenos.⁴¹ Los residuos mencionados anteriormente generalmente pueden ser tóxicos es por ello que se debe realizar un pre tratamiento de las aguas residuales siendo los microorganismos de gran importancia en este proceso debido a que los microorganismos pueden usar los contaminantes o sustancias orgánicas como fuente de energía y además son capaces de neutralizar, oxidar, precipitar o volatilizar los residuos tóxicos o infecciosos por medio de la producción de enzimas.^{42,43}

1.5 Configuraciones de una celda de combustible microbiana (CCM).

Como se mencionó anteriormente las celdas de combustible microbiana constan de una cámara anódica y otra catódica las cuales se separan por una membrana de

³⁷ SALAZAR, Maria del Socorro. Op. cit., p. 1-81

³⁸ SALAZAR, Maria del Socorro. Op. cit. p. 1-81

³⁹ SALAZAR, Maria del Socorro. Op. cit. p. 1-81

⁴⁰ MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M; PARKER, Jack. Brock. Op. cit., p. 28.

⁴¹ TORTORA, Gerard J.; FUNKE, Berdell R.; CASE, Christine L. Op. cit.

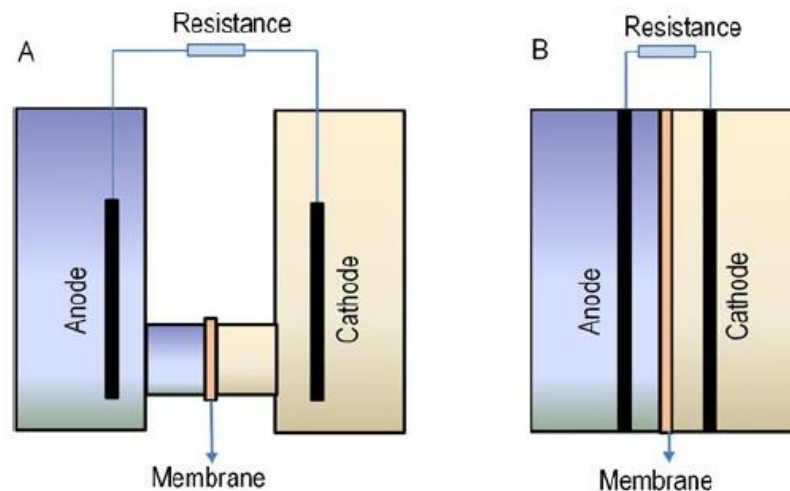
⁴² MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M; PARKER, Jack. Brock. Op. cit., p. 28

⁴³ MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M; PARKER, Jack. Brock. Op. cit., p. 28.

intercambio protónico, las celdas de combustible microbiana se pueden clasificar según su configuración en⁴⁴:

- **Celdas de combustible microbiana de dos cámaras:** este tipo de celdas se han utilizado he implementado a escala laboratorio y usualmente trabajan en modo Batch y con un medio químico definido para la producción de energía⁴⁵. Las CCM de dos cámaras están compuestas por una cámara anódica y catódica que se encuentran conectadas por medio de un puente de intercambio iónico y en ocasiones puede ser reemplazado por un puente salino, permitiendo el paso de los iones a la cámara catódica y bloqueando la difusión de oxígeno en la cámara anódica, la configuración más común es la denominada tipo H; La figura 2, muestra las posibles configuraciones de una CCM de dos cámaras⁴⁶.

Figura 2. Celda de combustible microbiana de dos cámaras.



Fuente: SUN,Guotao, et al. The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 98, no. 6, p. 2415-2427

De acuerdo a la figura 2, en la configuración de CCM de dos cámaras tipo H (A), presenta una distancia más larga entre los electrodos en comparación de las celdas de combustible microbiana de dos cámaras en forma de cubo (B) ⁴⁷.

⁴⁴ DU, Z.; LI, H. y GU, T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. En: BIOTECHNOLOGY ADVANCES. vol. 25, no. 5, p. 464-482

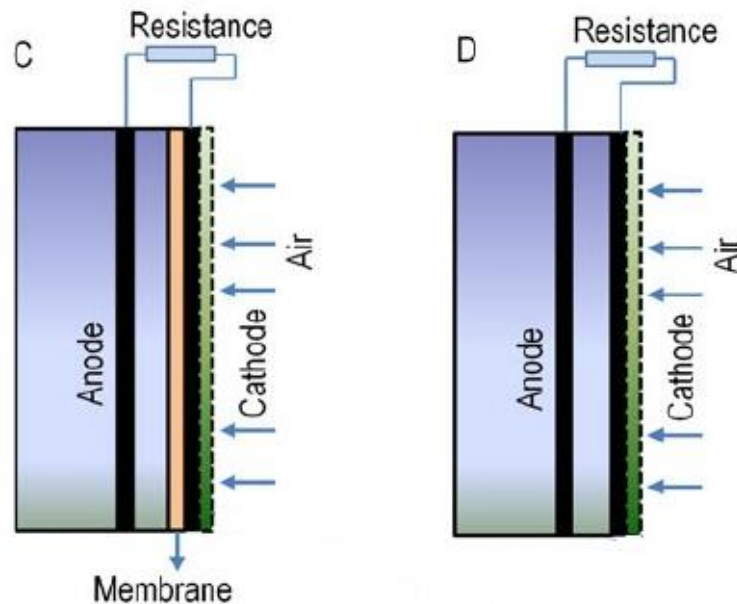
⁴⁵ Ibíd. p. 464-482

⁴⁶ PINEDA MARÍN, Ana del Pilar y ROSAS TAFUR, Martha Lizeth. Estado del Arte en Celdas de Combustible Microbianas (CCM) para la Producción de Bioenergía. Universidad Distrital, 2016. p. 55

⁴⁷ SUN,Guotao, et al. The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 98, no. 6, p. 2415-2427

- **Celdas de combustible microbiana de una cámara:** el compartimiento de la CCM se denomina cámara anódica, la cámara catódica está expuesta directamente al aire, al igual que las CCM de dos cámaras el transporte de electrones se realiza por medio de una membrana de intercambio iónico⁴⁸, a comparación de las CCM de dos cámaras esta configuración se considera en ventaja debido a costos menores de construcción ya que la cámara catódica en su configuración no necesita aireación siendo el oxígeno presente en el aire el aceptor final de electrones; la figura 3 muestra algunas de las configuraciones para éste tipo de celda.⁴⁹

Figura 3. Celda de combustible microbiana de una cámara.



Fuente: SUN,Guotao, et al. The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 98, no. 6, p. 2415-2427. Modificada por el autor.

Según la figura 3, las CCM de una cámara pueden presentar membrana (C) o de forma contraria no poseer membrana en su configuración (D), cuando no poseen membrana la generación de energía eléctrica puede incrementar en magnitudes eléctricas como la densidad de potencia⁵⁰

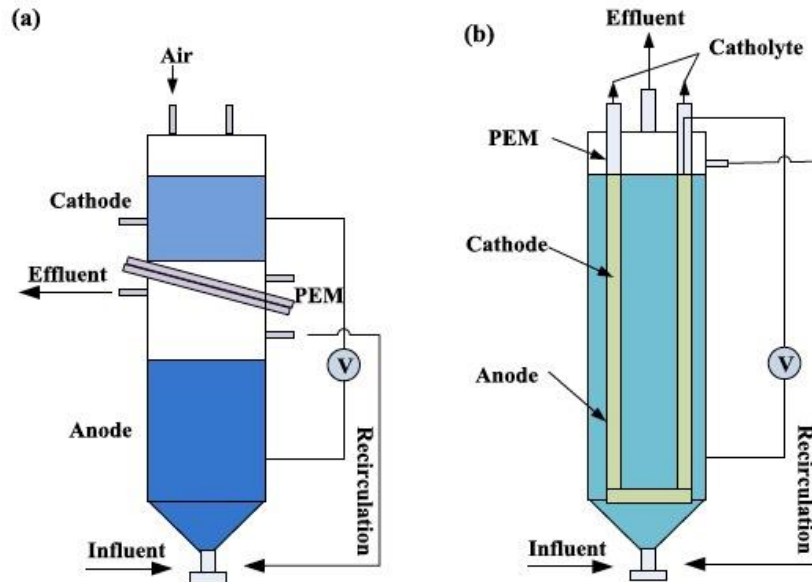
⁴⁸ PINEDA MARIN, Ana del Pilar y ROSAS TAFUR, Martha Lizeth. Op. cit., p. 55

⁴⁹DU,Z.; LI,H. and GU,T.Op. cit., p. 464-482

⁵⁰ SUN,Guotao, et al. Op. cit., p. 2415-2427

- **Celdas de combustible microbiana con sistema de flujo ascendente:** este tipo de CCM trabaja en modo de flujo continuo. El equipo se divide en dos secciones, donde una de las secciones será la cámara anódica y la otra sección la cámara catódica⁵¹. La figura 4 ilustra dos CCM con sistema de flujo ascendente con características de diseño diferentes:

Figura 4. Celda de combustible microbiana con sistema de flujo ascendente.



Fuente: HE, Li, et al. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. En: RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. Dec

Para la figura 4 (a), se busca mejorar el rendimiento de la CCM mediante el uso de una membrana de intercambio iónico que se encuentra en el interior del cátodo, se determina que este tipo de diseño genera estabilidad y puede trabajar durante tiempo prolongado. En la figura 4 (b), el diseño carece de una membrana de intercambio, generando una densidad de potencia baja, para este caso, el costo de operación es menor en comparación con la figura 4 (a)⁵².

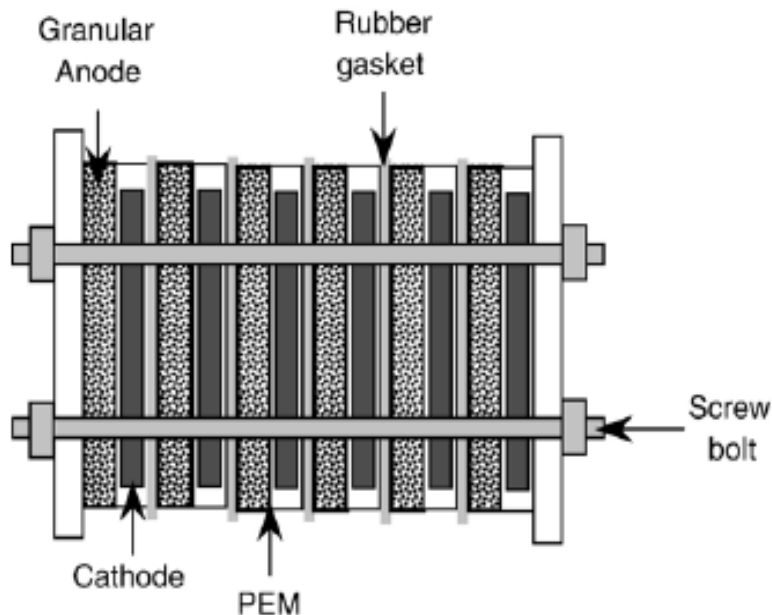
- **Celdas de combustible microbiana apilada:** las CCM apiladas se definen como varias CCM conectadas en serie o en paralelo, por medio de este diseño se pueden conseguir mejores salidas de voltaje o corriente eléctrica, la conexión de varias CCM en paralelo generan mayor eficiencia que las que se encuentran conectadas en serie, debido a que la celda conectada en paralelo tiene una mayor

⁵¹ DU, Z.; LI, H. and GU, T. Op. cit. p. 464-482

⁵² HE, Li, et al. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. En: RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. Dec

corriente de cortocircuito, es decir, permite una velocidad de reacción bio – electroquímica mayor que en las celdas que están conectadas en serie. Sin embargo, la conexión de varias celdas, ya sea paralela o en serie implica costos elevados a causa de emplear varios electrolitos seguidos. La figura 5 describe la configuración de CCM apilada, con 6 unidades individuales de grafito granular como ánodo.⁵³

Figura 5. Celda de combustible microbiana apilada.



Fuente: DU, Zhuwei; LI, Haoran; GU, Tingyue. A state of art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. En: *Biotechnology Advances*. Mayo, 2007, vol 25. No5.

1.6 ELECTRODOS EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

Se puede decir que los electrodos son uno de los componentes más importantes en una celda de combustible microbiana, los electrodos son los lo que permiten llevar a cabo la generación de energía eléctrica, tanto el ánodo como el cátodo se han estudiado a lo largo del tiempo en la implementación de las celdas de combustible microbiana⁵⁴.

⁵³ DU,Z.; LI,H. and GU,T.Op. cit.. p. 464-482

⁵⁴ WEI,Jincheng; LIANG,Peng and HUANG,Xia. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. [1]:2011. 9335-9344

En el ánodo las bacterias llevan a cabo la oxidación del sustrato, liberando los electrones gracias a la acción de rutas metabólicas, por otro lado, en el cátodo es donde llegan los electrones que se transportaron por un circuito externo, cuando entran en contacto con los protones provenientes de la cámara anódica a la cámara catódica resulta la formación de agua⁵⁵.

La elección correcta de los electrodos está relacionada con la configuración de la CCM, según lo encontrado en la bibliografía, existen los bio-electrodos, y los electrodos químicos⁵⁶. El criterio de selección de los electrodos está en las características fisicoquímicas que poseen, es decir, al momento de seleccionar el electrodo, independiente de la configuración de CCM en que se pueda encontrar, se debe determinar y seleccionar de acuerdo a: porosidad, área de contacto, estabilidad, durabilidad, conductividad, resistencia al esfuerzo mecánico, accesibilidad y costos.⁵⁷

1.6.1 Criterios para la selección de un electrodo. De manera general se describen las generalidades de los criterios al momento de seleccionar un material, es decir el principio físico o físico-químico bajo el cual se comportan:

1.6.1.1 Porosidad. Se define como una medida de los espacios vacíos en un material, la capacidad del material en absorber líquidos o gases⁵⁸. Cuando un material es poroso puede considerarse como un material aceptor de electrones, sin embargo, a mayor porosidad mayor formación de biopelícula o biofilm. La formación de biopelícula o biofilm no asegura la eficiencia del proceso y puede generar perturbaciones no deseadas en el sistema electroquímico⁵⁹.

1.6.1.2 Área de contacto. El área de contacto del electrodo, está relacionada con la resistencia que puede llegar a tener una CCM, cuando se desea disminuir la resistencia de una CCM, se recomienda aumentar el área de contacto del electrodo, cuando se aumenta el área de contacto del electrodo se aseguran más sitios donde se pueden llevar a cabo las reacciones⁶⁰.

⁵⁵ LOPEZ, Juan. Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales. Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica (CIDETEQ), 2014. p. 8-10.

⁵⁶ Ibid., p. 8

⁵⁷ Mustakeem. Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. En: MATERIALS FOR RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY. vol. 4, no. 4, p. 22

⁵⁸ WALSH, F.; GARCÍA, J. G. and LEGUEY, V. M. Un primer curso de ingeniería electroquímica. Club Universitario, 1999

⁵⁹ Mustakeem. Op. cit., p. 22

⁶⁰ Mustakeem. Op. cit., p. 22

1.6.1.3 Conductividad. Se recomienda un material con alta conductividad eléctrica debido al transporte de electrones que se genera dentro de la CCM, los electrones generados por los microorganismos deben viajar por el circuito, el ánodo y el cátodo, cuando un material es conductor implica menor resistencia a que el electrón fluya⁶¹. La conductividad eléctrica de un material es dependiente de su estructura atómica y molecular, bajo este criterio los metales son los conductores por excelencia. La conductividad es el inverso de la resistividad y se define por la ecuación 1⁶²:

Ecuación 1. Conductividad eléctrica

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{S}{m}$$

ρ = resistividad

La unidad de medida es siemens sobre metro

En este caso, se estudia la conductividad en medios sólidos ya que generalmente los electrodos empleados para una CCM estudiados se encuentran en estado sólido. Se puede decir que un material es conductor cuando sus bandas de valencia y conducción se superponen, en ese momento se forma la denominada “nube de electrones libres” causada por la corriente a la que se somete un material⁶³.

1.6.1.4 Resistividad. Se llama también resistencia eléctrica, se define por la ecuación 2⁶⁴

Ecuación 2. Resistencia eléctrica

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

R= resistencia en Ohm

S= sección transversal en m²

l= longitud en m

La resistencia eléctrica es la que indica el comportamiento del material en el momento en que pasa la corriente eléctrica, cuando un material tiene un alto valor de resistividad es mal conductor, en cambio cuando el valor es bajo, la conducción eléctrica es mejor, cuando se selecciona un material para el electrodo se busca que

⁶¹ Mustakeem. Op. cit., p. 22

⁶² HAYNES, W. M. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 93rd Edition. Taylor & Francis, 2012.

⁶³ Ibid.

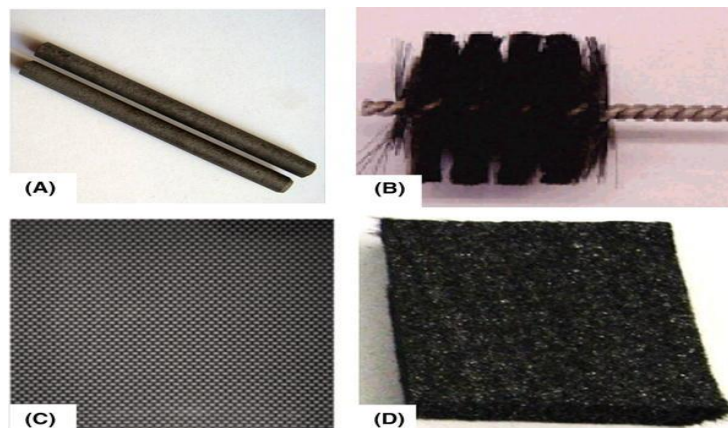
⁶⁴ SEARS, F. W.; FORD, A. L. and FREEDMAN, R. A. Física universitaria. Pearson Educación, 2005.

la resistencia a la energía eléctrica sea menor, recordando que los electrodos son los aceptores de electrones que circulan por el circuito externo, en el caso del ánodo entre mayor sea la “compatibilidad” entre el material y los electrones, se espera que la generación de energía eléctrica sea mayor.

1.6.2 Ánodo. En este tipo de electrodo es donde se lleva a cabo la oxidación, el ánodo debe cumplir con los criterios mencionados anteriormente, los materiales para el ánodo más utilizados son el metal y el carbón. El ánodo presenta una característica diferente al cátodo y es la formación de biofilm, esto ocurre cuando el material del ánodo tiene especial compatibilidad con el microorganismo, en ocasiones puede entenderse como un fenómeno favorable, pues facilita el transporte de electrones a través del circuito externo para posteriormente encontrarse en la cámara catódica.

• **Materiales convencionales de carbono:** en este grupo se encuentran las varillas de grafito, tela de carbón, papel carbón, fieltro de carbón y el carbón reticulado. El carbón es utilizado por cumplir con las características de conductividad, biocompatibilidad, estabilidad química y accesibilidad, es importante aclarar que en consecuencia de la accesibilidad no es un material de costo elevado, por lo que ha sido ampliamente estudiado. En la figura 6 se presentan las diferentes formas de carbono mencionadas⁶⁵:

Figura 6.Diferentes electrodos-ánodo carbonosos



Fuente: Mustakeem. Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. En: MATERIALS FOR RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY. vol. 4, no. 4, p. 22

Dónde: a) varilla de grafito, b) cepillo de fibra de carbono, c) tela de carbono y d) fieltro de carbono

⁶⁵ Mustakeem. Op. cit., p. 22

Como se puede observar de acuerdo a la figura 6, el carbón es un material versátil, altamente estudiado y cumple con los criterios establecidos para la generación de energía eléctrica en una CCM.

- **Materiales modificados:** en esta clasificación se encuentran los materiales modificados con el fin de mejorar la conducción de energía eléctrica, para la modificación de los materiales recientemente se ha empleado los nanotubos de carbono (CNT) la conductividad eléctrica, estabilidad química, biocompatibilidad, área de contacto son los principales criterios que se estudian en este tipo de materiales⁶⁶.
- **Materiales compuestos :** en esta categoría se encuentran los materiales modificados junto con otro tipo de materiales como los polímeros conductores, el estudio de estos materiales se realiza con el fin de mejorar la propiedad electrolítica que pueden llegar a obtener, así como la compatibilidad con el microorganismo, los materiales compuestos pueden también incluir materiales carbonosos como los descritos previamente. Cuando los materiales se modifican recibiendo el nombre de compuestos las propiedades que se estudian son distintas, ya que estos electrodos poseen mejores cualidades catalíticas⁶⁷.
- **Materiales metálicos:** uno de los materiales metálicos que más se utiliza es el acero inoxidable por sus propiedades no corrosivas, aun así, no es un material versátil o adaptable a todo tipo de sistemas⁶⁸.

1.6.3 Cátodo. En la gran parte de configuraciones de CCM, los electrones se transportan por un circuito externo donde finalmente llegan al cátodo, al entrar en contacto con los protones que se han transportado por el puente de intercambio y el oxígeno presente en la cámara catódica se genera agua. En la figura 7 se ilustra lo descrito anteriormente en el electrodo-cátodo⁶⁹:

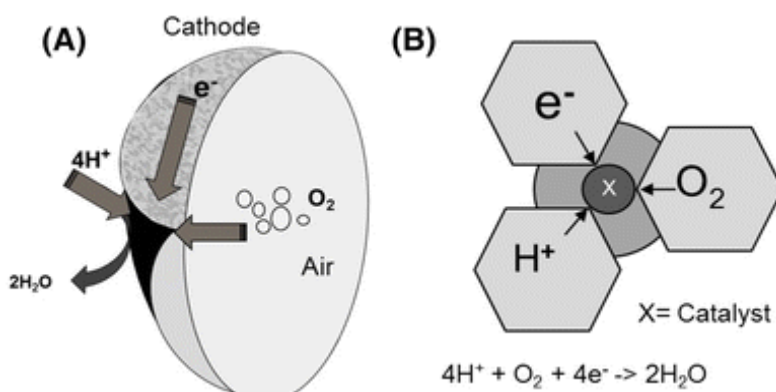
⁶⁶ CORREA-DUARTE, Miguel A., et al. Fabrication and biocompatibility of carbon nanotube-based 3D networks as scaffolds for cell seeding and growth. En: NANO LETTERS. vol. 4, no. 11, p. 2233-2236

⁶⁷ Ibid., p. 8

⁶⁸ Ibid., p. 8

⁶⁹ Mustakeem. Op. cit., p. 22

Figura 7.Reacción en el cátodo en un CCM



Fuente: Mustakeem. Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. En: MATERIALS FOR RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY. vol. 4, no. 4, p. 22

Como se puede observar en la figura 7, la formación de agua en la cámara catódica se lleva a cabo por el contacto entre las fases aire, protones H^+ y electrones, dando lugar a la formación de agua, la reacción que ocurre en este proceso es la reducción del oxígeno. En consecuencia, cuando el cátodo posee mayor actividad catalítica se esperarí que la reducción de oxígeno sea mayor, incrementando la generación de energía eléctrica en la CCM de manera indirecta.

Los materiales empleados para el ánodo pueden, en su mayoría, ser utilizados en el cátodo. Sin embargo, como se verá más adelante, al encontrarse el microorganismo en la cámara anódica las condiciones de oxígeno son limitadas, no ocurre lo mismo en la cama catódica por lo que el catado puede ser: expuesto al aire, expuesto al aire en fase acuosa y bio-cátodo⁷⁰.

Ahora bien, para determinar el electrodo que mejor se ajuste a cierta configuración de CCM, los criterios son: alta resistencia mecánica, propiedades catalíticas, alta conductividad eléctrica e iónica

• **Cátodos expuestos al aire y en fase acuosa**

En las investigaciones a escala laboratorio llevadas a cabo recientemente este tipo de cátodos ha sido empleado con frecuencia. El uso de cátodos expuestos al aire o en fase acuosa depende de la configuración de la CCM.

Los cátodos expuestos al aire consisten de tres capas; una primera capa de difusión que permanece expuesta al aire y es la que está en contacto con el oxígeno que

⁷⁰ LOPEZ, Juan. Op.cit., p. 8

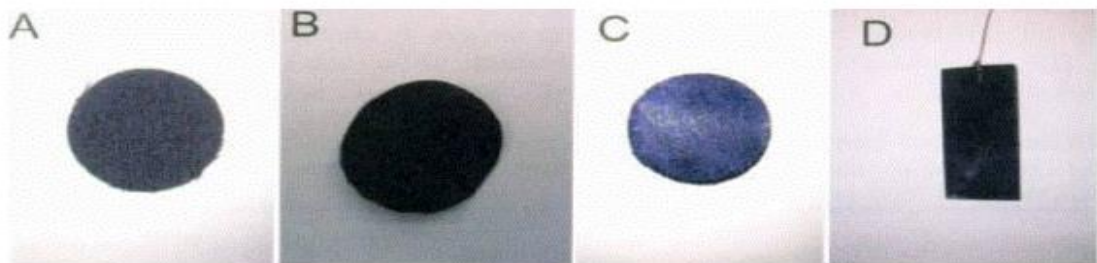
posteriormente se va a reducir, una segunda tapa de algún material conductor haciendo el papel de soporte y finalmente una capa de catalizador que se encuentra expuesta al aire. Los cátodos en fase acuosa tienen características similares a los cátodos expuestos al aire, los materiales son en su mayoría de tipo carbonosos, la diferencia se encuentra en la exposición al aire, estos cátodos son inyectados de oxígeno en forma de aire. Por comodidad y practicidad los estudios se han enfocado en los cátodos expuestos al aire, a razón del menor costo energético que implican y las altas densidades de potencia que son capaces de registrar⁷¹.

• Cátodos con distintas modificaciones

Cuando se desea mejorar el rendimiento de una CCM, en ocasiones se agrega algún tipo de catalizador al cátodo, esto para asegurar que la eficiencia y la posterior generación de energía eléctrica sea elevada, entre los catalizadores más utilizados y reportados en la bibliografía se encuentra el platino, en ocasiones se agregan aglomeraciones de Nafion en el fin de aumentar la solubilidad de los protones⁷².

El material del cátodo, consideran muchos investigadores en la tesis de Garrido Lucia, tiene la misma importancia que el material del que está compuesto el ánodo, la variación de la función y generación de energía eléctrica de la CCM está relacionada con la correcta selección del material, para este electrodo se pueden utilizar también materiales carbonosos, son los más estudiados recientemente, en la figura 8 se encuentran diferentes formas para los materiales carbonosos⁷³:

Figura 8.Tipos de cátodos



Fuente: LOPEZ, Juan. Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales. Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica (CIDETEQ), 2014. p. 8-10.

⁷¹ LOPEZ, Juan. Op. cit., p. 8

⁷² GARRIDO, Lucia. Simulación de la operación de una Microbial Fuel Cell para aplicación en sistemas aislados de la red; Universidad de Sevilla, 2016. p. 3-108.

⁷³ Ibid., p. 3-108

(A) Tela de carbón; (B) tela de carbón con catálisis de Pt por la zona en contacto con el líquido; (C) tela de carbón con separador de difusión; (D) electrodo de carbono usado en pilas de dos celdas suspendido en agua.

1.7 PUENTE DE INTERCAMBIO IÓNICO

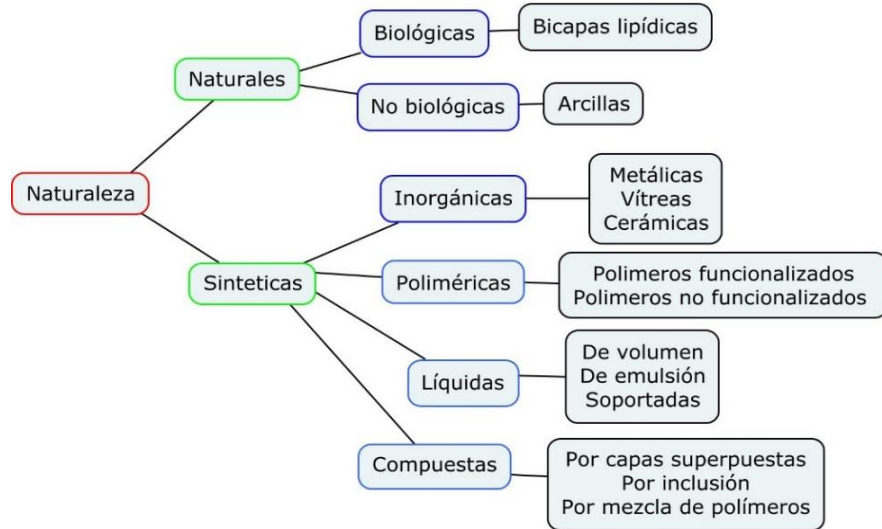
La función del puente de intercambio iónico es separar las cámaras catódica y anódica, recordando que es en la cámara anódica donde se lleva a cabo el proceso de oxidación, el puente evita que cualquier otro agente oxidante interfiera en el proceso, permitiendo que en la cámara anódica donde se encuentra el ánodo se lleven a cabo los procesos necesarios para que el microorganismo posteriormente permita la transferencia de electrones, por otra parte, en la cámara catódica donde se encuentra el cátodo los electrones mencionados reaccionarían; La separación que permite el puente de intercambio protónico es física, y es la composición del puente lo que puede llegar a determinar la eficiencia de una CCM, ahora bien, la disposición del puente depende directamente de la configuración de las cámaras, cuando la CCM es de una sola cámara este intercambiador protónico no se presenta en forma de puente sino como una membrana, cuando se utiliza una membrana, se ha demostrado, que puede incrementar la difusión de oxígeno y sustrato a través del sistema, pero esto se traduce en una menor eficiencia y disminución de la actividad del microorganismo en el ánodo⁷⁴.

1.7.1 Características del puente de intercambio iónico Cuando se selecciona un puente de intercambio protónico se deben tener en cuenta características como la selectividad de protones, estabilidad y firmeza. Sin importar el tipo de configuración de la CCM, está claro que la selección de las dos cámaras anódica y catódica se basan en la correcta selección de la membrana, inicialmente se estudia la clasificación de las membranas, en las figuras 9, 10 y 11 se determina la clasificación de las membranas con base en los criterios de naturaleza, estructura y el transporte que llevan a cabo respectivamente.⁷⁵

⁷⁴ LOPEZ, Juan. Op. cit., p. 8

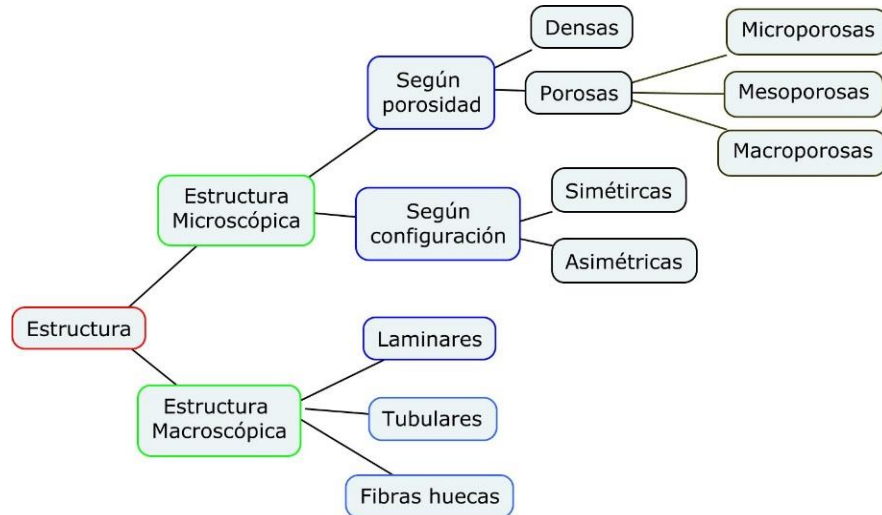
⁷⁵ MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006. p. 259

Figura 9. Clasificación de las membranas según su naturaleza



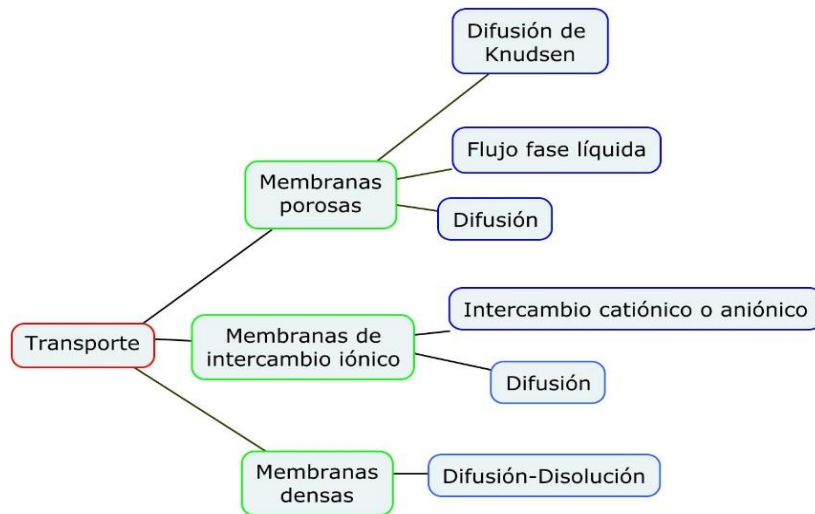
Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006. p. 259. Modificada por el autor

Figura 10. Clasificación de las membranas según su estructura



Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006. p. 259. Modificada por el autor

Figura 11. Clasificación de las membranas según el tipo de transporte



Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universidad Autónoma de Barcelona, 2006. p. 259. Modificada por el autor

Una vez determinada la clasificación de las membranas de acuerdo a su naturaleza, estructura y el transporte que llevan a cabo. Es posible determinar que las membranas implicadas en los procesos electroquímicos son membranas de intercambio iónico, estas membranas tienen una sub-clasificación: pueden ser membranas de intercambio catiónico o aniónico, o bien pueden ser membranas de difusión; Así mismo, las membranas que se utilizan en las CCM, son membranas sintéticas, poliméricas, en algunas ocasiones sintéticas.

• Membranas poliméricas

Este tipo de membranas se ha estudiado frecuentemente en todo tipo de escala por el gran rango de aplicabilidad, es un material que se estudia frecuentemente por la posibilidad de controlar las configuraciones moleculares volviendo las membranas más o menos selectivas y permeables, los polímeros pueden adoptar diferentes formas y se adaptan con mayor facilidad a diferentes tipos de diseño.

Membranas porosas y no porosas

Se puede decir que una membrana es porosa cuando sus poros tienen un diámetro superior a 20 Å, cuando no existen poros de ese tamaño la membrana se considera

densa, es decir no porosa⁷⁶; La porosidad es una característica importante, al momento de seleccionar un puente de intercambio protónico, según estudios realizados, cuando un polímero modificado es poroso tiende a garantizar el transporte efectivo de protones, pues posee más áreas de contacto donde retener los protones para posteriormente transportarlo en su estructura⁷⁷.

• **Materiales Poliméricos**

Este tipo de materiales se emplean para la preparación de las membranas poliméricas, el uso de los materiales poliméricos depende de la aplicación de la membrana.

• **Membranas de intercambio iónico**

Las membranas de intercambio iónico se diferencian de los otros tipos de membrana por tener grupos funcionales ionizables, estos grupos son permeables a electrolitos en solución acuosa. Cuando las membranas contienen grupos cargados negativamente, se denominan membranas de intercambio catiónico, por el contrario, cuando están cargadas positivamente se denominan membranas de intercambio de aniones. Estas membranas son formadas a partir de materiales poliméricos, sin embargo, recientemente han surgido estudios de membranas combinadas o constituidas con materiales inorgánicos, las adaptaciones de las membranas de intercambio iónico dependen nuevamente de la aplicación o la tecnología donde se desea implementar⁷⁸.

La figura 12 enlista los polímeros que se utilizan en la fabricación de este tipo de membranas:

⁷⁶ Ibid. p. 259

⁷⁷ Ibid. p. 259

⁷⁸ Ibid. p. 259

Figura 12. Polímeros que se utilizan en la fabricación de membranas de intercambio iónico

Tipo	Polímero
Membranas sulfonadas perfluoradas	Nafion®
	Flemion®
	Aciplex®
	Dow®
	Selemión®
	Gore-Select®
Membranas sulfonadas no fluoradas	Poli(benzimidazol)
	Estireno/etileno-butadieno/stireno sulfonado
	Poliimididas sulfonadas
	Poliariletersulfonas parcialmente sulfonadas
	Poly(benzylsulphonic acid) siloxane PBS
	Divinilbenceno-estireno sulfonado
	Poliéterétercetona sulfonada (SPEEK)

Fuente: MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006. p. 259. Modificada por el autor

Las modificaciones de los diferentes tipos de membrana se llevan a cabo para cumplir con las propiedades ideales en una membrana de transporte de iones, los criterios pueden resumirse en:

- Estabilidad química
- Estabilidad electroquímica
- Propiedades químicas compatibles con el sustrato o fuente de iones
- Baja permeabilidad
- Alto transporte de electrolito
- Selectiva a protones
- Accesibilidad

Sin embargo, según lo reportado en la bibliografía, las membranas ideales para la implementación en la electroquímica no logran cumplir con cada uno de los criterios, se puede decir que el estudio de estas membranas no es muy diversificado y la selección de los materiales en la mayoría de los casos se limita únicamente a criterios como la accesibilidad o la selección de protones para su implementación.

1.7.2 Material del puente de intercambio iónico. Como se ha mencionado anteriormente, la selección del material del puente de intercambio iónico debe cumplir con criterios establecidos en la bibliografía, en la metodología se

determinarán los materiales más reportados en la bibliografía y se estudiará la composición, junto con los demás criterios, con el fin de determinar el más apropiado para la implementación de una CCM, los criterios están relacionados con las características o propiedades físico-químicas expuestas a continuación:

- **Capacidad de intercambio de iones (IEC):** Esta propiedad estudia la capacidad de la membrana para captar los protones provenientes de la cámara anódica, y se determinan con base en la ecuación 3

Ecuación 3. Capacidad de intercambio de iones (IEC) ⁷⁹

$$IEC = \frac{a \times b}{m}$$

IEC, es la capacidad de intercambio iónico, las unidades con mmol g⁻¹
a*, volumen agregado de valorante en el punto equivalente (mL)
b*, concentración molar de valorante
m*, membrana seca peso en (g)

Cuando se lleva a cabo la determinación de la capacidad de intercambio de iones en una membrana en ocasiones se utiliza NaCl como valorante, la función principal es que los iones de Sodio ocupen el espacio que tenían los protones dentro de la membrana, para llevar a cabo esta determinación hace falta de un procedimiento de laboratorio, sin embargo en varias ocasiones los materiales de las membranas dentro de su hoja de especificaciones, en el caso en que sean preparados de manera sintética con diferentes clase de materiales, contienen el valor de esta característica dentro de su descripción

- **Conductividad** La conductividad se puede calcular según la ecuación 4⁸⁰:

Ecuación 4. Conductividad

$$\sigma = \frac{l}{r \times S}$$

σ = conductividad

r = distancia entre electrodos, detección de potenciales y la resistencia a la membrana

S = área de sección transversal de la membrana

⁷⁹ XU, Juan, *et al.* Fouling of proton exchange membrane (PEM) deteriorates the performance of microbial fuel cell. [1]:2012. 1817-1824

⁸⁰ *Ibid.*, p. 1817-1824

Nuevamente para este caso la determinación de la conductividad requiere de un estudio de laboratorio, sin embargo el valor de esta propiedad se encuentra especificado en la bibliografía para algunos materiales.

1.8 EFECTOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

La generación de energía de una celda de combustible microbiana se ve afectada por factores como: el tipo de microorganismo, tipo y concentración de sustrato, fuerza iónica, pH, temperatura y el diseño del equipo; con el fin de mejorar el funcionamiento de la celda se pueden regular parámetros tales como, el efecto de los materiales de los electrodos, el sistema de intercambio de protones, las condiciones de operación de las cámaras anódica y catódica y la el pH⁸¹.

1.8.1 Variables de proceso. Los instrumentos de medición y control se pueden clasificar de dos maneras: la primera de acuerdo a la función del instrumento, algunos de estos instrumentos pueden ser elementos primarios, transmisores, instrumentos ciegos etc., y por otra parte se clasifican según la variable del proceso. De acuerdo a la variable de proceso los instrumentos se clasifican en instrumentos de nivel, presión, temperatura, pH, conductividad, etc., esta clasificación se realiza dependiendo el tipo de señal que se requiere medir. En el presente documento se hace énfasis en los instrumentos de medición y control en función de la variable de proceso, debido a que en el funcionamiento de una celda de combustible microbiana se encuentran variables de proceso que pueden afectar la operación de la celda, siendo la temperatura una de las principales variables que se requiere controlar:⁸²

- **Temperatura:** la medida de temperatura es una de las medidas más comunes y relevantes en los procesos industriales porque determina las ganancias o pérdidas de calor en un proceso, para este proyecto la temperatura es una variable importante para que el crecimiento del microorganismo se de en las condiciones apropiadas. Los instrumentos de medición de temperatura se ven relacionados con distintos fenómenos que permiten medir esta variable de forma directa o indirecta, por ejemplo variaciones de volumen, variaciones de resistencia de un elemento conductor o semiconductor, intensidad de radiación emitida por un cuerpo, entre otros; para relacionar la medida de temperatura con estos fenómenos se utilizan instrumentos como termómetros de vidrio, termopares, pirómetros de radiación, termómetros de resistencia, etc.⁸³
- **pH:** para la determinación del pH óptimo de una CCM, se debe tener en cuenta la actividad llevada a cabo por el microorganismo en la cámara anódica, normalmente el valor de pH de una CCM convencional oscila entre valores de 6-

⁸¹ DU,Z.; LI,H. and GU,T. Op. cit. p. 464-482

⁸² CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación industrial. Sexta edición. Barcelona, España: Marcombo, S.A., 1997

⁸³ Ibid.

9, se espera que el valor sea diferente entre las cámaras, teniendo en cuenta que la acción metabólica es llevada a cabo en la cámara anódica.

- **Potencial de Oxido- reducción (ORP):** así como el pH, esta variable esta omitida a los requerimientos de la bacteria, es una medida de la habilidad de un sistema para reducir (ganancia de electrones) o para oxidar (perdida o donación de electrones). Generalmente el proceso oxidativo requiere de condiciones en ausencia de oxígeno para la cámara anaerobia donde se llevan a cabo las rutas metabólicas del microorganismo.
- **Voltaje:** las celdas de combustible microbiana, según lo reportado en la bibliografía, alcanzan voltajes de máximo **0.3 a 0.7 V**, sin importar la configuración del circuito (abierto o cerrado), el voltaje siempre depende de la resistencia externa y la corriente, la relación de las dos variables se expresa en la ecuación 5: ⁸⁴

Ecuación 5. Voltaje

$$E = I \times R_{ext}$$

El voltaje de una celda de combustible microbiana no se comporta de la misma manera que una celda de combustible convencional, esto se debe a la presencia del microorganismo, entre el proceso biológico del microorganismo se encuentra la colonización del electrodo mediante el crecimiento del microorganismo, generación de enzimas o estructuras para la transferencia de electrones y transporte de los electrones extracelularmente.

- **Intensidad de corriente eléctrica:** cantidad de energía que circula a través del circuito⁸⁵

Ecuación 6. Intensidad de corriente eléctrica.

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = intensidad de corriente eléctrica en Amperios (A)

Q = Carga eléctrica en Culombios (C)

t = Tiempo en segundos (seg).

- **Densidad de corriente:** es la cantidad de carga o corriente eléctrica que pasa por el electrodo⁸⁶.

⁸⁴ LOPEZ, Juan. Op. cit.

⁸⁵ FOWLER, R. J. Electricidad: principios y aplicaciones. Reverté, 1986. p. 349

⁸⁶ *Ibíd.*, p. 349

Ecuación 7. Densidad de corriente

$$j = \frac{I}{a}$$

j = Densidad de corriente en Amperios/m² (A/m²)

a = Área del electrodo en metros cuadrados (m²)

- **Potencia:** es la cantidad de energía que entrega o genera la CCM en un tiempo determinado.⁸⁷

Ecuación 8. Potencia

$$P = V * I$$

P = Potencia en watts (W)

V = Voltaje en voltios (V)

I = Intensidad de corriente eléctrica en amperios (A)

- **Densidad de potencia:** Es la cantidad de energía que se genera por unidad de área del electrodo empleado.⁸⁸

Ecuación 9. Densidad de potencia

$$P^* = \frac{P}{a}$$

P* = Densidad de potencia en watts/m² (W/m²)

⁸⁷ Ibíd., p. 349

⁸⁸ Ibíd., p. 349.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de cada uno de los temas planteados se deben tener en cuenta el objetivo general y los objetivos específicos ya establecidos, iniciando con el estudio de las posibles configuraciones de la celda de combustible microbiana, análisis de las condiciones de operación, materiales apropiados e instrumentación para finalmente evaluar el rendimiento de la celda y su eficiencia para la producción de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales.

2.1 ESTUDIO Y ANALISIS DE LAS POSIBLES CONFIGURACIONES, OPERACIÓN Y MATERIALES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

2.1.1 Estudio de las configuraciones y selección de una CCM. Se realizará un estudio de las diferentes configuraciones presentes en las celdas de combustible microbianas a escala laboratorio, por medio de una tabla de recopilación de datos haciendo uso de diferentes fuentes bibliográficas, se identificarán las celdas de combustible microbianas más estudiadas en los últimos años relacionando artículos desde el año 2006 al 2017, se evaluarán diferentes características como el tipo de configuración usado en el estudio, la capacidad de producción de energía, la cual puede estar expresada en densidad de potencia o en la densidad de corriente y el año de publicación del artículo relacionado. Posteriormente se seleccionará las dos configuraciones con mayor número de estudios realizados a escala laboratorio y con mayor capacidad de producción de energía eléctrica. Finalmente se realizará un cuadro comparativo donde se enunciarán las ventajas y desventajas de los tipos de CCM seleccionados, se tendrán en cuenta aspectos como facilidad de uso, adaptabilidad para futuras experimentaciones y estudios de las configuraciones realizadas a escala laboratorio.

2.1.2 Análisis de las condiciones de operación de una CCM. Para determinar las condiciones de operación de la celda de combustible microbiana es importante conocer el tipo de microorganismo a utilizar, ya que son las condiciones de crecimiento de las bacterias las que definirán la operación de la CCM. La selección de las cepas que se estudiarán para la producción de energía y tratamiento de agua residual, se realizaron teniendo en cuenta el trabajo de investigación titulado “Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio” de los autores Sergio Andrés Medina Mesa y María Julieta Zapata Rojas, llevado a cabo en el grupo de investigación de Energías Alternativas de la Fundación Universidad de América.

Para generar continuidad en la investigación, se evaluarán las condiciones de crecimiento de las cepas *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa* por ser las bacterias seleccionadas, posteriormente se identificarán las condiciones de operación adecuadas para el crecimiento de las bacterias, estudiando variables como, pH, temperatura, sustrato y clasificación según el potencial de óxido reducción.

2.1.2.1 pH. Cuando se evalúa el crecimiento microbiano es importante tener controlado el pH dentro de la celda debido a que cada microorganismo tiene un rango de pH en el cual se favorece su crecimiento. Se realizará una revisión bibliográfica para identificar el valor de pH óptimo para las cepas estudiadas, teniendo en cuenta que los valores de pH más comunes en los microorganismos se acercan a la neutralidad.

2.1.2.2 Temperatura. La temperatura es una de las variables más importantes que afectan el crecimiento del microorganismo y su supervivencia en diferentes medios, por esta razón se considera importante el estudio de esta variable para establecer las condiciones de operación de la celda y garantizar el crecimiento microbiano. A temperaturas muy elevadas o muy bajas el microorganismo no crecerá, se estudiará la relación que tienen las cepas seleccionadas con la temperatura, cabe resaltar que los microorganismos pueden ser *psicrófilos*, temperaturas óptimas bajas (0 °C – 12 °C); *mesófilos*, temperatura óptimas moderadas (10 °C – 45 °C); *termófilos*, temperaturas óptimas altas (40 °C – 65 °C) e *hipertermófilos*, temperaturas óptimas elevadas (65 °C – 95 °C)⁸⁹. Teniendo en cuenta que cada microorganismo maneja temperaturas de operación diferentes, se identificará las temperaturas óptimas para las cepas seleccionadas y de este modo conocer la temperatura a la cual operará la celda, para mantener el control de temperatura de la en la CCM se hará uso de nevera de poli estireno expandido la cual tiene la función de mantener las condiciones adecuadas de temperatura.

2.1.2.3 Sustrato. El sustrato de una CCM es de gran importancia en la generación de energía eléctrica y el crecimiento microbiano. Teniendo en cuenta que en el presente trabajo se estudia la generación de energía eléctrica haciendo uso de agua residual sintética, (tripticasa de soya), se procederá a identificar los requerimientos nutricionales que posee esta sustancia, se hará énfasis en identificar los macronutrientes y micronutrientes presentes en el sustrato para posteriormente realizar un estudio que permita identificar si los requerimientos nutricionales brindados a los microorganismos empleados son los adecuados para su crecimiento.

⁸⁹ MADIGAN, M. T., *et al.* Op. cit., p. 152-157

2.1.2.4 Potencial de óxido reducción. El potencial de óxido reducción es el parámetro que define en qué condiciones crecerá el microorganismo, por ende, permitirá identificar las condiciones ambientales en las que trabajará la celda, ya sea en ausencia de oxígeno (anaerobios) o en presencia de oxígeno (aerobios). Se estudiará el potencial de óxido reducción de las bacterias *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa* para identificar la operación de la celda en especial de la cámara anódica en donde se llevará a cabo el proceso metabólico de la bacteria. Como se mencionó anteriormente, cuando se realiza un proceso metabólico que involucre la oxidación de sustancias preferiblemente se trabaja en condiciones anaerobias, sin embargo con el estudio a realizar se busca identificar si las condiciones serán anaerobias facultativas o anaerobias estrictas y si alguna de las bacterias seleccionadas puede realizar su proceso metabólico en presencia de oxígeno.

2.1.3 Material de las cámaras. Seleccionada la configuración más adecuada para la generación de producción de energía, se determinarán los materiales para la CCM, inicialmente se identificarán las partes que componen una CCM, las cuales son; cámara anódica, cámara catódica, membrana de intercambio de protones y electrodos, y posteriormente determinar los materiales apropiados. Se seleccionará el material de las cámaras (anódica y catódica), por medio de una revisión bibliográfica de artículos y/o libros que permitan identificar los materiales más utilizados en la construcción para la configuración de la CCM seleccionada, para la selección del material se tendrán en cuenta criterios como:

2.1.3.1 Propiedades eléctricas. Inicialmente se revisará la conductividad eléctrica y la resistividad de los materiales usados en el ensamble de las cámaras de una CCM. La conductividad eléctrica es la capacidad de una sustancia o material para permitir el paso de energía y/o corriente a través de él. En las CCM el material de las cámaras debe tener una baja conductividad eléctrica (aislante), ya que se busca que el paso de electrones se realice únicamente por los electrodos seleccionados, se evaluará la conductividad eléctrica de los materiales más usados en la construcción de las cámaras de la CCM, identificando el material con menor conductividad eléctrica con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la celda. Un material de cámaras con buena conductividad puede afectar el rendimiento de la celda porque podría atraer los electrones liberados durante el metabolismo de los microorganismos y alterar el transporte de electrones que se realiza en los electrodos.

2.1.3.2 Resistencia a la temperatura. Se analizará la resistencia a la temperatura de los materiales más usados en las cámaras de las CCM, inicialmente se estudia esta variable porque el material de las cámaras se debe adaptar a la temperatura a la cual se favorezca el crecimiento microbiano, de igual forma estas serán sometidas a un proceso de esterilización después de terminada cada prueba garantizando que no exista presencia de otros microorganismos que inhiban la acción de la cepas seleccionadas y evitando que dentro de la cámara quede presencia de algún contaminante que pueda ser tóxico y altere la vida del microorganismo en las futuras experimentaciones, dicho proceso de esterilización se realiza a una temperatura mayor a 100 °C por esta razón el material que se seleccionará debe ser resistente a la temperatura sin importar el número de veces al cual sea sometido a este proceso y sin presentar ninguna deformación en la estructura de la cámara que pueda alterar el futuro funcionamiento de la celda. La selección del material de las cámaras de acuerdo a la resistencia a la temperatura se estudiará determinando la conductividad térmica y la temperatura máxima de utilización en cada caso.

2.1.3.3 Formación de Biopelícula. La formación de esta sustancia puede afectar el rendimiento de la celda debido a que gran cantidad de microorganismos se almacenan en las cavidades o porosidades del material inhibiendo la generación de energía, causando contaminación y posible corrosión. Se evaluará la formación de biopelícula de los distintos materiales de acuerdo a lo reportado en la bibliografía.

2.1.4 Material de los electrodos. Como se ha mencionado anteriormente el material de los electrodos debe ser un material con estabilidad química, buen conductor eléctrico, resistente a la corrosión y un área superficial extensa. Para la selección del material de los electrodos, se realizará una revisión bibliográfica de los materiales más usados en el funcionamiento de las CCM a escala laboratorio bajo las condiciones de operación establecidas, una vez determinados los materiales que con mayor frecuencia se utilizan a escala laboratorio para la celda de combustible microbiana, se determinará el material más apropiado para la CCM, de acuerdo con los criterios enumerados a continuación:

2.1.4.1 Generación de energía eléctrica. Los electrodos son uno de los componentes más importantes en el momento de generar la energía eléctrica, la correcta selección del electrodo se ve relacionada con la eficiencia de la celda de combustible microbiana, los electrodos, ánodo y cátodo, cumplen papeles distintos en la conversión de energía química en energía eléctrica, el ánodo por una parte es colonizado por los microorganismos, dando lugar al transporte de electrones por el circuito externo, el cátodo recibe los electrones y se encuentra en una interface con electrones, oxígeno y los protones que ocupan lugar en la cámara catódica, cuando se determina la generación de energía eléctrica, de acuerdo a lo reportado en la bibliografía, se hace una relación entre el voltaje o densidad de corriente generada por la CCM y el material seleccionado para los electrodos, tanto ánodo como cátodo⁹⁰.

2.1.4.2 Propiedades eléctricas. Como se mencionó anteriormente, la conductividad y resistividad son propiedades que interfieren en el funcionamiento de la celda de combustible, ya que los materiales con buena conductividad permitirán el paso de los electrones, a comparación del material de las cámaras, los electrodos se deben caracterizar por ser materiales conductivos, a mayor conductividad del electrodo mayor será el transporte de electrones y por ende mayor será la generación de energía. Se evaluará la conductividad eléctrica y la resistividad de los diferentes tipos de electrodos con el fin de seleccionar el material de electrodo que mejor se adapte para el proceso de generación de energía eléctrica.

2.1.4.3. Resistencia a la temperatura. La temperatura es una de las variables con mayor relevancia en el proceso de generación de energía, como se ha mencionado anteriormente, ésta variable determina en gran medida la acción microbiana de la CCM, generar condiciones óptimas de crecimiento puede asegurar mayor generación de energía eléctrica. Al determinar los materiales adecuados para implementar en los electrodos de una celda de combustible microbiana se tendrá en cuenta los valores de temperatura óptimos a los que las bacterias llevan a cabo su crecimiento y la respectiva acción microbiana; Además, ya que en esta investigación se busca asegurar la acción microbiana únicamente de las cepas seleccionadas en el sistema y así mismo evitar la formación de biopelícula, los electrodos junto con los demás componentes de la CCM se verán sometidos a elevadas temperaturas de esterilización, mayor a 100°C

⁹⁰ ASENSIO, Y., et al. Selection of cheap electrodes for two-compartment microbial fuel cells. [1]:2017. 235-240

2.1.5 Material puente de intercambio iónico. Se determina el puente de intercambio iónico una vez determinada la configuración de la celda de combustible microbiana, esto debido a que el puente es dependiente de la configuración de la CCM; Un puente de intercambio protónico se utiliza principalmente para separar las dos cámaras al no permitir que exista contacto físico, además da paso a los protones provenientes de la cámara anódica para poder llevar a cabo los procesos con eficiencia en la cámara catódica. Para la selección del material del puente de intercambio iónico se estudiarán dos características importantes, la primera es la composición, el material debe necesariamente permitir el paso de protones y ser permeable a los mismos, se determinará el material más apropiado de acuerdo a lo reportado en la bibliografía, para posteriormente conocer de que está compuesto o cual es la estructura de cada uno de los materiales que se reporta y poder establecer las ventajas y desventajas de cada uno; Así mismo, una vez determinados los materiales más reportados y encontrado las características que los diferencian entre sí, el segundo criterio concluyente para la selección será la resistencia a la temperatura, recordando que la celda de combustible microbiana trabajará a ciertas condiciones de operación dadas por los microorganismos, el material debe soportar las temperaturas requeridas por el sistema sin cambiar su composición o sus características fisicoquímicas.

2.1.5.1 Composición. De acuerdo a lo referenciado en las generalidades teóricas, la composición de una membrana de intercambio iónico o protónico es variable, en la selección del material para el puente de intercambio se estudiarán las diferentes composiciones que pueden presentarse, la clasificación y la relación que tiene con propiedades como la permeabilidad; la composición se estudiará una vez determinados los materiales más empleados y será una característica utilizada para diferenciar los materiales y conocer desde el fundamento o los principios teóricos cual es el material más adaptable de acuerdo a los criterios establecidos.

2.1.5.2 Propiedades del material del puente de intercambio. Se estudiará la influencia que tienen los diferentes tipos de materiales del puente de intercambio en la generación de energía eléctrica, con el objeto de identificar si el material del puente será una membrana de intercambio iónico, caracterizada por la selectividad hacia el paso de iones de hidrógeno (H^+), o un puente salino el cual contiene un electrolito que se encarga de permitir el paso de los protones de la cámara anódica a la cámara catódica.

2.1.6 Dimensiones de una CCM. Se estudiarán las dimensiones de las CCM para identificar la influencia que tienen en la generación de energía, teniendo en cuenta que estos dispositivos son una tecnología relativamente nueva los estudios que se realizarán serán a escala laboratorio en donde se estudiarán factores como:

2.1.6.1 Volumen de cámaras. El volumen de las cámaras está directamente relacionado con el volumen de sustrato, debido a que el estudio a realizar es la continuación de la investigación de celdas de combustible microbiana realizado por el grupo de investigación de Energías Alternativas, el volumen de sustrato empleado será igual al de estudios anteriores, cabe resaltar que el trabajo de investigación que se está realizando es a escala laboratorio, por tal razón el volumen de cámaras no puede superar los 50 litros.

2.1.6.2 Área y volumen de los electrodos. Con el objetivo de darle continuidad a la investigación de celdas de combustible microbiana llevada a cabo en el grupo de investigación de Energías Alternativas de la Fundación Universidad de América, las dimensiones de área y volumen de los electrodos se basan en la determinación realizada al inicio de la investigación de los autores Sergio Andrés Medina y María Julieta Zapata Rojas en el trabajo de grado “*Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbiana a escala laboratorio*”. Con el fin de corroborar la veracidad de las dimensiones de los electrodos se llevará a cabo una revisión bibliográfica donde se comparará experimentaciones bajo condiciones de operación similares a la estudiada en el presente trabajo, evaluando la capacidad de producción de energía.

2.1.6.3 Área de contacto del puente de intercambio. En la determinación del área de contacto se estudia inicialmente en la bibliografía y lo reportado según las investigaciones, la influencia que tiene esta característica en la determinación de las dimensiones relacionado con la generación de energía eléctrica para una CCM, la determinación del área de contacto también deberá tener relación con la configuración de la CCM, recordando que se estudian las dimensiones del puente, cámaras y electrodos de las celda de combustible microbiana.

2.1.6.4 Longitud el puente de intercambio. La longitud del puente es una dimensión que se relacionará de manera directa con la distancia de los electrodos, el puente de intercambio es uno de los componentes de una celda de combustible microbiana que depende de la configuración, se determinará un tamaño que sea adaptable al tipo de CCM que se estudiará.

2.2 INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA EN LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA Y ENSAMBLE

2.2.1 Selección de la instrumentación empleada para el control de las variables de proceso. La instrumentación en un proceso es una herramienta de ayuda para la medición y control de las variables involucradas, por ello, para el correcto funcionamiento de la celda de combustible microbiana es de gran importancia controlar algunos parámetros que garanticen el buen funcionamiento del equipo, se seleccionará la instrumentación para el control de algunas variables.

2.2.1.1 Sensor de temperatura. Como se ha mencionado anteriormente la temperatura es uno de los principales parámetros que se debe controlar en una CCM, ya que se considera que esta variable es una de las más importantes para determinar el adecuado crecimiento microbiano. La selección del sensor de temperatura se realizará teniendo en cuenta el rango de temperaturas en el cual se va a trabajar, rango que se define por las condiciones de crecimiento de las bacterias expuesta en el numeral 2.1.2, además se seleccionará un sensor de bajo coste y que se adapte de manera apropiada en la cámara anódica del equipo sin afectar la hermeticidad de este. Por medio de un cuadro se relacionarán las ventajas y desventajas de algunos sensores de temperatura utilizados en la industria y su respectivo funcionamiento.

2.2.1.2 pH-metro. Para identificar si en la CCM se presentan condiciones de acidez o alcalinidad se empleará un pH-metro que permitirá monitorear los valores de esta variable, debido al cambio en el potencial electroquímico entre la muestra y el bulbo capilar del pH-metro, las tomas de muestras de pH se realizarán en la cámara anódica por ser donde actúan las bacterias y hacen su proceso metabólico en el cual al desprender electrones (e^-) e hidrogeniones (H^+) se puede ver afectadas las condiciones iniciales de pH.

2.2.1.3 Multímetro. Se empleará un multímetro que se adapte a los valores de voltajes medidos por este tipo de celda, también se tendrá en cuenta que este equipo sea capaz de relacionar otra variable de medición como es la intensidad de corriente, mediante el principio galvanométrico, es importante aclarar que para el tipo de CCM que se estudiará no es necesario definir y estudiar la distribución y el valor de la resistencia interna debido a que se trabajará con un circuito abierto.

2.2.2 Software de instrumentación virtual. El *Software* de datos es una herramienta adicional adaptada a la celda de combustible microbiana donde se almacenan los datos a lo largo de la variable estipulada; Con la programación adecuada, se puede establecer control o medición de la variable, dependiendo del requerimiento del sistema, al estudiar un *Software* de datos apropiados se debe tener en cuenta la duración a lo largo del tiempo de cada corrida experimental, la adaptabilidad que tiene el *Software* a la instrumentación y la accesibilidad del mismo. Para la determinación del *Software* de datos se llevará a cabo una revisión bibliográfica, se determinarán los casos o investigaciones donde la CCM trabaja en conjunto con algún tipo de *Software*, para posteriormente determinar el *Software* adecuado que mejor se adapte a las características establecidas.

2.2.3 Condiciones de uso y ensamble de la celda de combustible microbiana. Una vez determinados todos los componentes que hacen parte de una celda de combustible microbiana se llevará a cabo un manual de instrucciones donde se determinan las condiciones de uso de la CCM junto con el correcto ensamblaje que se ilustrará en los Anexos del presente documento, además se llevarán a cabo

planos del equipo donde se identifique las dimensiones y piezas que componen la CCM implementada.

2.3 EFICIENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA Y EVALUACIÓN DEL DQO

2.3.1 Estimación de parámetros para la evaluación de producción de energía eléctrica. Se evaluará la producción de energía eléctrica y la eficiencia de la CCM, para la evaluación de estos parámetros se tendrán en cuenta criterios como:

- *Voltaje*: el voltaje es uno de los principales parámetros que se estudia cuando se habla de la generación de energía eléctrica, sin embargo, una celda de combustible microbiana, aunque trabaje con los principios fundamentales de una celda de combustible convencional las mediciones y las formas de calcularlos es distinta; El voltaje se define como la cantidad de voltios que actúan o genera un aparato, prototipo o sistema eléctrico, puede medirse con diferentes tipos de instrumentos como es el caso de la celda de combustible microbiana que se desea implementar.

Ecuación 10. Voltaje

$$E = I \times R_{ext}$$

- *Intensidad de corriente eléctrica*: la intensidad de corriente eléctrica se define como la cantidad de flujo o carga eléctrica que pasa por un circuito en un tiempo determinado.

Ecuación 11. Intensidad de corriente eléctrica.

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = intensidad de corriente eléctrica en Amperios (A)

Q = Carga eléctrica en Culombios (C)

t = Tiempo en segundos (seg).

- *Densidad de corriente*: es la cantidad de carga o corriente eléctrica que pasa por el electrodo.

Ecuación 12. Densidad de corriente

$$j = \frac{I}{a}$$

j = Densidad de corriente en Amperios/m² (A/m²)

a = Área del electrodo en metros cuadrados (m²)

- *Potencia*: es la cantidad de energía que entrega o genera la CCM en un tiempo determinado.

Ecuación 13. Potencia

$$P = V * I$$

P = Potencia en watts (W)

V = Voltaje en voltios (V)

I = Intensidad de corriente eléctrica en amperios (A)

- *Densidad de potencia*: es la cantidad de energía que se genera por unidad de área del electrodo empleado.

Ecuación 14. Densidad de potencia

$$P^* = \frac{P}{a}$$

P^* = Densidad de potencia en watts/m² (W/m²)

2.3.2 Análisis de resultados de la producción de energía eléctrica. En el análisis de resultados se comparará la producción de energía de las dos cepas seleccionadas, *Escherichia Coli* y *Pseudomonas Aeruginosa*, con el documento “Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio” de los autores Sergio Andrés Medina y María Julieta Zapata Rojas, el presente trabajo es una continuación de la investigación sobre celdas de combustible microbiana realizada en el grupo de investigación de energías alternativas de la Fundación Universidad de América, en el trabajo mencionado se estudia la generación de energía eléctrica de los microorganismos en donde el proceso metabólico se puede llevar a cabo mediante el uso de un mediador o sin él, sin embargo el análisis de resultados que se llevará a cabo no contemplará el uso de mediador para la generación de energía eléctrica en una celda de combustible microbiana.

2.3.3 Análisis de DQO. Al finalizar las corridas experimentales se realizará las pruebas de Demanda Química de Oxígeno (DQO), las cuales son un parámetro

para evaluar la calidad del agua y se determina por medio de la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica del agua. Se realizarán 3 pruebas de DQO, las cuales son el blanco de prueba, agua residual sintética sin bacterias, y las muestras resultantes de la cámara anódica las cuales son una con *Escherichia coli* y otra de *Pseudomonas Aeruginosa*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según el planteamiento de la metodología mencionada anteriormente se exponen los resultados y sus respectivos análisis en la selección, instrumentación y funcionamiento de la celda de combustible microbiana.

3.1 CONFIGURACIÓN, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN SELECCIONADAS

3.1.1 Selección de la configuración de la CCM. En la **tabla 2**, se estudiaron los tipos de configuraciones usadas a escala laboratorio, se hizo el estudio usando alrededor de diez artículos consultados en diferentes bases de datos como Sciencedirect, Ebsco Host, Springer Link entre otros.

Tabla 2. Tipos de configuraciones de CCM usadas a escala laboratorio..

Tipo de celda	Densidad de potencia o densidad de corriente	Fecha de publicación del artículo	Referencia
Dos cámaras	0,0135 mW/ cm ²	Octubre-16	91
Tubular	0,0073 mA/ cm ²	Febrero-16	92
Una cámara	0,08 mA/ cm ²	Febrero-13	93
Tubular	0,02 mA/cm ²	Marzo-12	94
Dos cámaras	0,0014 mW/ cm ²	Abril-11	95
Una cámara	0,0361 mW/ cm ²	Junio-09	96
Dos cámaras	0,23 mA/ cm ²	Junio-09	97

⁹¹ PASSOS, Vinicius Fabiano, et al. Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater treatment plant. En: SCIENTIA AGRICOLA. Oct.vol. 73, no. 5, p. 424-428

⁹² GUDE, Veera Gnaneswar. Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview. [1]:2016. 287-307

⁹³ VOLOGNI, Valentina, et al. Increased power generation from primary sludge by a submersible microbial fuel cell and optimum operational conditions. En: BIOPROCESS AND BIOSYSTEMS ENGINEERING. May.vol. 36, no. 5, p. 635-642

⁹⁴ SAAVEDRA SALAS, Igor Marcos. Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro. CyberDocs

⁹⁵ BUITRÓN, Germán and PÉREZ, Jaime. Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. En: TIP.REVISTA ESPECIALIZADA EN CIENCIAS QUÍMICO-BIOLÓGICAS. vol. 14, no. 1, p. 5

⁹⁶ LUO, Yong, et al. Power generation from furfural using the microbial fuel cell. [1]:2010. 190-194

⁹⁷ PATIL, Sunil A., et al. Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. [1]:2009. 5132-5139

Tabla 2. (Continuación)

Tipo de celda	Densidad de potencia o densidad de corriente	Fecha de publicación del artículo	Referencia
Una cámara	0,0163 mA/cm ²	Marzo-09	98
Dos cámaras	0,0031 mW/ cm ²	Septiembre-07	99
Dos cámaras	0,06 mA/cm ²	Septiembre-07	100
Una cámara	0,0354 mW/cm ²	Mayo-06	101

Al observar la tabla 2 se determinó que las CCM con más estudios a escala laboratorio son las de una y dos cámaras. En el **tabla 3**, se presentan las ventajas y desventajas de las configuraciones seleccionadas.

⁹⁸ ALDROVANDI, Aba, et al. Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell. [1]:2009. 3252-3260

⁹⁹ LIANG, Peng, et al. Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 77, no. 3, p. 551-558

¹⁰⁰ HA, Phuc Thi; TAE, Beomseok and CHANG, In Seop. Performance and Bacterial Consortium of Microbial Fuel Cell Fed with Formate. En: ENERGY & FUELS. Jan.vol. 22, no. 1, p. 164-168

¹⁰¹ HEILMANN, Jenna and LOGAN, Bruce E. Production of Electricity from Proteins Using a Microbial Fuel Cell. En: WATER ENVIRONMENT RESEARCH. May.vol. 78, no. 5, p. 531-537

Tabla 3. Ventajas y desventajas de las CCM más usadas a escala laboratorio¹⁰²

	CCM de dos cámaras	CCM de una cámara
VENTAJAS	Puede trabajar de forma continua o discontinua.	Costos bajos de construcción.
	Permite el estudio de la distancia de los electrodos y la influencia que estos tienen en la generación de energía eléctrica.	Ampliamente estudiada en aplicaciones industriales. Mejor eficiencia en la producción de energía eléctrica.
	Ampliamente usada en estudios a escala laboratorio.	
	Posee una amplia variedad de diseños para llevar a cabo su funcionamiento.	
DESVENTAJAS	En estudio constante para llevar a cabo modificaciones en su diseño	
	Costos elevados de construcción.	Diseño único.
	La eficiencia del proceso se ve favorecida con agitación.	No es completamente anaerobia debido a disposición de electrodos.
	Existe posibilidad de contaminación.	

De acuerdo a los resultados de las tablas 2 y 3 junto con lo consultado en las fuentes bibliográficas se decidió seleccionar la celda de dos cámaras como la configuración apropiada para la producción de energía eléctrica, debido a que este tipo de celdas son las más empleadas para realizar estudios a escala laboratorio y permite que se realicen estudios en cuanto a las dimensiones y áreas de contacto de las partes que la componen,¹⁰³ a pesar que las celdas de una cámara reporten mejores resultados en la producción de energía, se evidenció que la diferencia entre las densidades de potencia para estos tipos de configuración no es concluyente, sin embargo, con base en lo consultado se decide llevar a cabo el diseño de una celda de combustible

¹⁰² PINEDA MARÍN, Ana del Pilar y ROSAS TAFUR, Martha Lizeth. Op. cit., p. 54-65

¹⁰³ PINEDA MARÍN, Ana del Pilar y ROSAS TAFUR, Martha Lizeth. Op. cit., p. 54-65

microbiana de dos cámaras tipo H, dado que la disposición de las CCM de dos cámaras permite tener un mayor control sobre la cámara que se encuentra en condiciones anaerobias, a su vez, permite preparar el electrolito y evaluar la eficiencia de la celda al hacer uso de diferentes concentraciones de electrolito u otros tipos de membrana. Debido a que en el presente trabajo se quiere estudiar diferentes factores que pueden afectar la generación de energía eléctrica, como es la influencia del área superficial de los electrodos, el área de contacto del puente con las cámaras y las composiciones de los diferentes tipos de membrana de intercambio iónico, se evalúa la producción de energía y tratamiento de agua residual con una CCM de dos cámaras, como se mencionó anteriormente. Las celdas de dos cámaras se encuentran en constante estudio con el fin de mejorar factores de su diseño para aumentar la producción de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales.¹⁰⁴

3.1.2 Condiciones de operación de una CCM. Según lo mencionado previamente, para la determinación de las condiciones de operación de la celda de combustible microbiana se determinaron las condiciones de operación de las dos cepas *Escherichia Coli* y *Pseudomonas aeruginosa* estudiando las condiciones óptimas de crecimiento en las variables descritas a continuación.

3.1.2.1 pH. La determinación del valor de pH para las dos cepas seleccionadas se determinó de acuerdo a lo reportado en la bibliografía

- *Escherichia coli*: el valor óptimo para su crecimiento se encuentra cercano a los valores de neutralidad, entre el rango de 6-7, este tipo de cepa ve limitado su óptimo crecimiento cuando el rango de pH es elevado.¹⁰⁵
- *Pseudomonas aeruginosa*: el óptimo crecimiento de la cepa se encuentra en valores de pH cercanos a la neutralidad, cercanos a 7¹⁰⁶

¹⁰⁴ HE,Li, et al. Op. cit.

¹⁰⁵ Fundación vasca para la seguridad agroalimentaria. *Escherichia coli*. [Electronic]. 28 de Febrero de. [Consultado el 16 de Noviembre de2017]. Disponible en: http://www.elika.net/datos/pdfs_agrupados/Documento84/3.Ecoli.pdf

¹⁰⁶ PREZ ROMERO,Silvia Gabriela; VILCACHAGUA,Alania andMASIEL,Yorka. Efecto de la temperatura en el crecimiento de dos cepas ATCC de *Pseudomonas sp.* expuestas a polipropileno.

3.1.2.2 Temperatura. La determinación de la temperatura se llevó a cabo según las características de los microorganismos empleados para la producción de energía en la CCM, se determinaron los valores de acuerdo a la clasificación de los microorganismos en relación con la variable.

- *Escherichia coli*: la condición de crecimiento óptima para el microorganismo se encuentra en un rango de 35 a 40 °C¹⁰⁷
- *Pseudomonas aeruginosa*: el rango de temperatura óptimo se encuentra en valores cercanos a los 37°C¹⁰⁸

De acuerdo a la clasificación de los microorganismos en relación con la temperatura se determinó que son microorganismos mesófilos, es decir, que la temperatura óptima moderada para su crecimiento se encuentra en 39°C, de acuerdo al rango de temperatura encontrado en la bibliografía para las dos cepas se establece una temperatura de operación de 37°C, asegurando un crecimiento favorable que se verá relacionado con la producción de energía eléctrica en cada uno de los casos.

3.1.2.3 Sustrato. La selección del sustrato se lleva a cabo para cumplir con los requerimientos nutricionales del microorganismo de macronutrientes y micronutrientes, así por ejemplo, para los macronutrientes el microorganismo requiere fuentes de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, calcio, fósforo, potasio, sodio, magnesio, azufre e hierro para llevar a cabo su crecimiento; de la misma forma requiere micronutrientes que aunque no son esenciales, suplementan su crecimiento, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.1.2.3 se evaluó los requerimientos nutricionales del agua residual sintética empleada, la cual en este caso corresponde a la Tripticasa de soya, la tabla 5 muestra la composición de este tipo de agua residual:

Tabla 4. Componentes de la tripticasa de soya¹⁰⁹

Componente	Concentración (g/l)
Triptona	17
Peptona de soja	3
NaCl	5
Glucosa	2,5
KH ₂ PO ₄	2,5

¹⁰⁷ Fundación vasca para la seguridad agroalimentaria. *Op. cit.*

¹⁰⁸ PREZ ROMERO, Silvia Gabriela; VILCACHAGUA, Alania and MASIEL, Yorka. *Op. cit.*

¹⁰⁹ MERK MILLIPORE, Tryptic Soy Broth (TSB), Casein-Peptone Soy meal-Peptone (CASO) Broth [Consultado el 20 de noviembre 2017]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Tryptic-SoyBroth,MDA_CHEM105459?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com.co%2F#anchor_orderingcomp

La tripticasa de soja es un hidrolizado de proteína, en consecuencia, cuenta en su composición con peptona de soja, producto de origen vegetal, cuya composición incluye aminoácidos esenciales y péptidos de bajo peso molecular como **fuentes de nitrógeno**, se utiliza como suplemento para el medio de cultivo microbiológico por su aporte nutricional, que incluye, calcio, magnesio, potasio y sodio en su composición.¹¹⁰; Junto con la peptona de soja el caldo tripticasa de soja cuenta con una **fuentes de nitrógeno adicional** en la triptona de soja, que incluye en su composición una mezcla de aminoácidos y péptidos de mayor tamaño junto con calcio, magnesio, potasio y sodio.¹¹¹

Por otra parte, la **fuentes de carbono** del sustrato se encuentra representada en la Glucosa, la **fuentes de oxígeno, potasio y fósforo** es aportada por el fosfato de potasio mono básico (KH_2PO_4), y la **fuentes de sodio** se encuentra principalmente en el cloruro de potasio NaCl.

3.1.2.4 Potencial de óxido reducción. La determinación del potencial de óxido – reducción determina la disponibilidad de oxígeno para la cámara anaerobia, recordando que en dicha cámara es donde se lleva a cabo la acción metabólica de cada uno de los microorganismos

- *Escherichia coli*: Anaerobia facultativa¹¹², puede desarrollarse en presencia o ausencia de oxígeno, sin embargo, el crecimiento óptimo se genera con ausencia del mismo
- *Pseudomonas aeruginosa*: Aerobia¹¹³, se desarrolla bajo condiciones con presencia de oxígeno.

Según las características de las bacterias, se determinan condiciones anaerobias para la cámara anódica en la celda de combustible microbiana; Para asegurar condiciones anaerobias dentro de la cámara se utilizó un sobre generador de anaerobiosis.

3.1.3 Material de las cámaras. El material empleado en las cámaras debe garantizar el crecimiento del microorganismo y la estabilidad del proceso, por esta razón se identificaron los materiales más empleados a escala laboratorio, siendo el vidrio, policarbonato y plexiglás los materiales más utilizados en la construcción de las cámaras de la celda de combustible microbiana a escala laboratorio, estos

¹¹⁰ GRISP Research Solution. Bacteriological Peptone. [Print(0)]. Porto, Portugal. Enero 2016.[Consultado el 28 Noviembre2017]. Disponible en:<http://www.grisp.pt/docs/gcm22-bacteriological-peptone.pdf>.

¹¹¹ GRISP Research Solution. Tryptone. [Electronic(1)]. Porto, Portugal. [Consultado el 15 de Noviembre2017]. Disponible en: <http://www.grisp.pt/docs/gcm23-tryptone.pdf>

¹¹² RIVAS,C. y MOTA,M. Bacterias anaerobias.

¹¹³ SILVA CASTILLO, René Oswaldo. Aislamiento e identificación de *Pseudomonas* spp. y patrón de resistencia a antimicrobianos en reptiles en cautiverio. 2015. Tesis de Licenciatura. Quito: UCE.

materiales se puede usar ya sea en la cámara anódica, en la cámara catódica o en ambas, factor que depende del tipo de configuración seleccionado. Para la selección del material de las cámaras se estudiaron las siguientes propiedades de los diferentes materiales empleados.¹¹⁴

3.1.3.1 Propiedades eléctricas. Como se mencionó en el apartado 2.1.3.1, el material de las cámaras debe ser un material con baja conductividad eléctrica, que permita el paso de electrones exclusivamente por los electrodos seleccionados, por esta razón se estudió la conductividad o resistividad eléctrica de 3 de los materiales usados en las cámaras de una CCM en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades eléctricas de materiales para la cámara de una CCM

Material	Conductividad σ (S/m) a 20 °C	Resistividad ρ ($\Omega \cdot m$) a 20 °C
Vidrio	" 10^{-11} - 10^{-15} " ¹¹⁵	" 10×10^{10} - 10×10^{14} " ¹¹⁶
Policarbonato	-	" 10^{15} " ¹¹⁷
Plexiglás	-	" 10^{14} " ¹¹⁸

Se puede determinar según la tabla 5, que el material más resistivo es el vidrio, en consecuencia, entre los tres materiales estudiados en la tabla es el menos conductor de energía eléctrica, lo cual lo hace un material adecuado para ser implementado.

3.1.3.2 Resistencia a altas temperaturas. El material de las cámaras debe ser un material adaptable a las condiciones de operación de la celda, teniendo en cuenta que ésta última se ve sometida a temperaturas elevadas, mayor a 100°C, cuando se lleva a cabo el proceso de esterilización, así mismo, debe ser adecuado para la temperatura de crecimiento óptimo del microorganismo sin dañar su estabilidad química física y mecánica, en la tabla 6 se estudian las propiedades térmicas de los tres materiales empleados para una CCM.

¹¹⁴ DU,Z.; LI,H. y GU,T. Op. cit.,p. 464-482

¹¹⁵ HELMENSTINE,Anne Marie. Table of electrical resistivity and conductivity . Jul, 19. [Consultado el 22 de Noviembre de2017]. Disponible en: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>

¹¹⁶ Ibíd.

¹¹⁷ MatWeb andAutomation Creations. Online Materials Information. [Consultado el 22 de Noviembre de2017]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/MaterialGroupSearch.aspx>

¹¹⁸ GOOD FELLOW,5. 0. Catalogo en linea, Materiales. [Electronic]. [Consultado el 22 de Noviembre de2017]. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Polimetacrilato-de-Metilo.html>

Tabla 6. Propiedades térmicas de materiales para la cámara de una CCM

Material	Temperatura Máxima de utilización (°C)	Conductividad Térmica a (25°C) W/ m* K
Vidrio	"500" ¹¹⁹	"0,6- 1" ¹²⁰
Policarbonato	"115 – 130" ¹²¹	"0,19 - 0,22" ¹²²
Plexiglás	"50 – 90" ¹²³	"0,17 - 0,19" ¹²⁴

De acuerdo a la tabla 6, el vidrio es un material que puede someterse a elevadas temperaturas sin ver alteradas sus propiedades químicas físicas y mecánicas, por lo que es un material adecuado para implementar en la CCM, además, tiene una conductividad térmica alta a condiciones estándar, el material de las cámaras debe permitir la conducción de calor a través de la cámara asegurando las condiciones de temperatura requerida por los microorganismos

3.1.3.3. Formación de Biopelícula. En la determinación del material más apropiado tanto para la cámara anódica y catódica en una celda de combustible microbiana la formación de biopelícula es un criterio de selección, se busca que el material empleado no implique la adhesión de los microorganismos para evitar una posterior formación de biopelícula, el vidrio; Según señala el autor Nazar, los microorganismos no presentan adhesiones importantes para éste tipo de material¹²⁵; Fletcher señala que para la formación de biopelícula en materiales como el vidrio hace falta la influencia de otro tipo de parámetros como la distancia de separación entre las bacterias y el material o las características del electrolito, para el caso de las *Pseudomonas fluorescens*.¹²⁶

De acuerdo a lo estudiado en las tablas 5 y 6 así como lo reportado en la bibliografía sobre la formación de biopelícula, se determinó el vidrio como material para ser implementado tanto en las cámaras anódica y catódica en la CCM, debido a que es un material con poca conductividad eléctrica, aislante, lo que asegura que el flujo de energía eléctrica generada por las bacterias se dará por los electrodos de la CCM

¹¹⁹ VIDRASA. Propiedades físicas y químicas Vidrio borosilicato [Electronic]. Catálogo. [Consultado el 22 de Noviembre de 2017]. Disponible

en: http://www.vidrasa.com/esp/productos/duran/duran_pf.html

¹²⁰ Ibid.

¹²¹ MatWeb and Automation Creations. Op. cit.

¹²² MatWeb and Automation Creations. Op. cit.

¹²³ GOOD FELLOW, 5. 0. Catálogo en línea, Materiales. Op. cit.

¹²⁴ GOOD FELLOW, 5. 0. Catálogo en línea, Materiales. Op. cit.

¹²⁵ NAZAR, Julio. Biofilms bacterianos. En: REVISTA DE OTORRINOLARINGOLOGÍA Y CIRUGÍA DE CABEZA Y CUELLO. vol. 67, no. 1, p. 161-172

¹²⁶ FLETCHER, M. Attachment of *Pseudomonas fluorescens* to glass and influence of electrolytes on bacterium-substratum separation distance. 1988. 2027-30 p.

y no por las cámaras, la conducción del calor de las cámaras será la adecuada, esto gracias a que el vidrio posee una conductividad térmica elevada en comparación con los otros dos materiales estudiados, policarbonato y plexiglás; Además es un material resistente a elevadas temperaturas por lo que el proceso de esterilización al que se somete la celda no afectará las propiedades del material, Finalmente, este tipo de material ha sido estudiado en cuanto a la formación de biopelícula lo que permite llevar a cabo el criterio de selección.

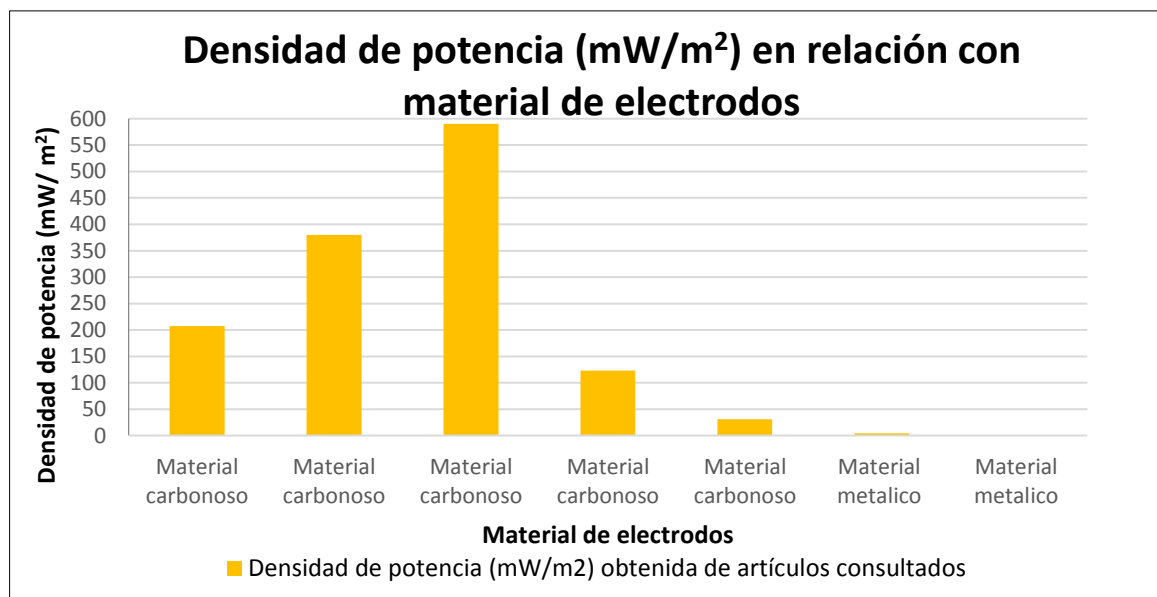
3.1.4 Material de los electrodos. Los electrodos en las celdas de combustible microbiana son parte fundamental para llevar a cabo el proceso de producción de energía y tratamiento de agua residual, debido a que el electrodo es el encargado de realizar la transferencia de electrones para la generación de energía eléctrica y a su vez es el lugar donde se llevará a cabo el crecimiento del microorganismo; por estas razones se consideró el estudio de materiales que sean conductivos eléctricamente, resistentes a la corrosión, químicamente estables, con amplia área superficial, de bajo coste y que puedan ser colonizados por la bacteria.¹²⁷ Los materiales usados en los electrodos de las CCM pueden ser electrodos de carbono, que son ampliamente usados y eficaces en este tipo de tecnología logrando generar altas densidades de potencia, por otra parte se han implementado materiales metálicos, como lo es el acero inoxidable, titanio, entre otros, sin embargo este tipo de materiales no tiene buen rendimiento en la producción de energía debido a su superficie lisa lo que impide que la bacteria colonice el material y realice la transferencia del electrones.¹²⁸

¹²⁷ ZHOU, Minghua, et al. An overview of electrode materials in microbial fuel cells. [1]:2011. 4427-4435

¹²⁸ SUN, Guotao, et al. Op. cit., p. 2415-2427

3.1.4.1 Generación de energía eléctrica. Identificados los materiales de electrodos más empleados en el funcionamiento de las CCM y de acuerdo a lo consultado en referentes bibliográficos que abordan la temática, se determinó cuál de estos dos tipos de materiales, carbonosos y metálicos, son los más eficientes para la producción de energía eléctrica; para la selección del material se debe considerar que la función del electrodo del ánodo es diferente a la del cátodo, siendo en el ánodo donde se da lugar a la colonización bacteriana y al transporte de electrones por medio de un circuito externo, mientras que en el cátodo se reciben los electrones y se ponen en contacto con el oxígeno y los protones creando un sobre potencial, sin embargo, el material de electrodos del ánodo y del cátodo pueden ser similares o iguales.¹²⁹ En el gráfico 1, se relaciona el tipo de material con la cantidad de energía producida en un CCM, esta energía se expresa como densidad de potencia.^{130,131,132,133}

Gráfico 1. Relación del material del electrodo con la generación de energía eléctrica según los artículos consultados.



Como se evidencia en el gráfico 1, los materiales a base de carbón son el tipo de material más usado en este tipo de tecnología, logrando generar mayor densidad de potencia, estos materiales cumplen con la mayoría de las características enunciadas anteriormente tales como, resistencia a la corrosión, alta conductividad

¹²⁹ SUN, Guotao, et al. Op. cit., p. 2415-2427

¹³⁰ FUTAMATA, Hiroyuki, et al. Adaptation of soil microbes during establishment of microbial fuel cell consortium fed with lactate. [1]:2013. 58-63

¹³¹ MÄKINEN, Annukka E., et al. Bioelectricity production on xylose with a compost enrichment culture. [1]:2013. 15606-15612

¹³² PANDIT, Soumya, et al. Performance of electron acceptors in catholyte of a two-chambered microbial fuel cell using anion exchange membrane. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 102, no. 3, p. 2736-2744

eléctrica, bajo coste y buena área superficial; en primera instancia una alta conductividad eléctrica del electrodo permite que el transporte de electrones se realice de manera efectiva y de esta manera disminuir la pérdida de resistencia, factor que puede alterar el rendimiento de la celda, el área superficial de los electrodos es otro factor importante a considerar debido a que la reacción de óxido – reducción del proceso se realiza en la superficie de los electrodos, permitiendo que se realice una adecuada colonización del microorganismo, la porosidad y el tamaño de poro son características que pueden mejorar el comportamiento entre las bacterias y el electrodo y por ende la eficiencia de la celda, por tal razón la superficie porosa de los materiales carbonosos favorecen el proceso.^{134,135} Algunos de los materiales carbonosos usados en este tipo de tecnología son la tela de carbón, cepillo de carbón, placas de grafito, papel de grafito, carbón granular entre otros.¹³⁶

En el trabajo realizado por Asensio, Montes y colaboradores¹³⁷ comparan el rendimiento de la celda al usar diferentes materiales de electrodos tanto para el ánodo como para el cátodo, estudiando las siguientes combinaciones, (fieltro de carbono-espuma de carbono, fieltro de carbono para ánodo y cátodo, fieltro de carbono-tela de carbón y fieltro de carbono-acero inoxidable), siendo el fieltro de carbono el material que obtuvo mayor generación de energía, lo cual se asocia con la relación directa entre el material del electrodo y el área superficial, sin embargo, al usar acero inoxidable como material del electrodo se evidenció que el rendimiento para la producción de energía fue muy bajo. Cabe resaltar que algunos materiales metálicos presentan mejores propiedades conductoras que los materiales carbonosos, a pesar de ello las investigaciones se han visto limitadas debido a que algunos materiales no son químicamente compatibles con los microorganismos empleados, afectando el rendimiento de la CCM al expulsar iones metálicos perjudicando el crecimiento bacteriano.¹³⁸ Por lo anterior se logra concluir que efectivamente, el material de los electrodos es un factor influyente en el rendimiento de la CCM, siendo los materiales de carbono los que poseen un mejor

¹³³ HOU, Junxian, et al. A comparative study of graphene-coated stainless steel fiber felt and carbon cloth as anodes in MFCs. En: BIOPROCESS & BIOSYSTEMS ENGINEERING. vol. 38, no. 5, p. 881-888

¹³⁴ Wei-Hsuan Hsu; Hung-Yin Tsai and Ying-Chen Huang. Characteristics of Carbon Nanotubes/Graphene Coatings on Stainless Steel Meshes Used as Electrodes for Air-Cathode Microbial Fuel Cells. En: JOURNAL OF NANOMATERIALS. Jan 1, vol. 2017

¹³⁵ Fei Yu; Chengxian Wang and Jie Ma. Applications of Graphene-Modified Electrodes in Microbial Fuel Cells. [0]: Basel: MDPI AG, 2016. 807 ISBN 1996-1944.

¹³⁶ SANTORO, Carlo, et al. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. [1]: 2017. 225-244

¹³⁷ ASENSIO, Y. Op. cit., p. 235-240

¹³⁸ HUSSEIN, I.; MANSOUR, A. and BAHGAT, M. Metal electrodes and organic enrichment in doubled and single chambered Microbial Fuel Cell (MFC) for electricity generation. En: JOURNAL OF BIOCHEMICAL TECHNOLOGY. vol. 4, no. 1, p. 554-560

comportamiento en las propiedades eléctricas y biocompatibles en comparación con otros materiales como metales tales como el cobre o níquel.

3.1.4.2 Propiedades eléctricas. Para determinar el material de los electrodos más adecuado se estudia la conductividad o resistencia de los materiales carbonosos, estas propiedades eléctricas determinan la capacidad del electrodo para permitir el paso de corriente eléctrica en su estructura en el caso de la conductividad y para el caso de la resistividad es el parámetro que determina que tanto se opone el material al paso de energía eléctrica.¹³⁹ Teniendo en cuenta que el carbono es un elemento que puede formar diferentes tipos de enlaces híbridos, este elemento puede poseer gran variedad de estructuras atómicas, entre ellas el carbón grafito, carbón diamante, carbón amorfo y nanotubos de carbono, los cuales son algunos ejemplos de alótropos de carbono.¹⁴⁰ En la tabla 7, se determinan los valores de las propiedades eléctricas en los diferentes tipos de materiales carbonosos.

Tabla 7. Propiedades eléctricas de los materiales carbonosos

Material	Resistividad ρ ($\Omega \cdot m$) a 20°C	Conductividad σ (S/m) a 20°C
Carbón-amorfo	5×10^{-4} - 8×10^{-4}	1.25 - 2×10^3
Carbón- grafito	2.5×10^{-6} - 5.0×10^{-6}	2 - 3×10^5
Carbón- diamante	1×10^{12}	$\sim 10^{-13}$

Fuente: HELMENSTINE, Anne Marie. Table of electrical resistivity and conductivity. [0]. Jul, 19. [Consultado el 22 de Noviembre de 2017]. Disponible en: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>

Cada uno de los materiales de la tabla 7 puede encontrarse en diferentes presentaciones, ya sea papel, lámina, cepillo, tela, entre otros, el tipo de presentación también tiene un efecto en la generación de energía eléctrica de la CCM; De acuerdo a lo consultado en los referentes bibliográficos, en el gráfico 2, se relacionan algunas presentaciones de materiales carbonosos y la máxima densidad de potencia alcanzada en mW/m^2 , el estudio de la influencia de la presentación del electrodo en la generación de energía eléctrica no se ha llevado a cabo de manera precisa, sin embargo autores como Rahimnejad, Shuang y colaboradores han hecho una revisión en las investigaciones que se han llevado hasta el momento^{141,142}.

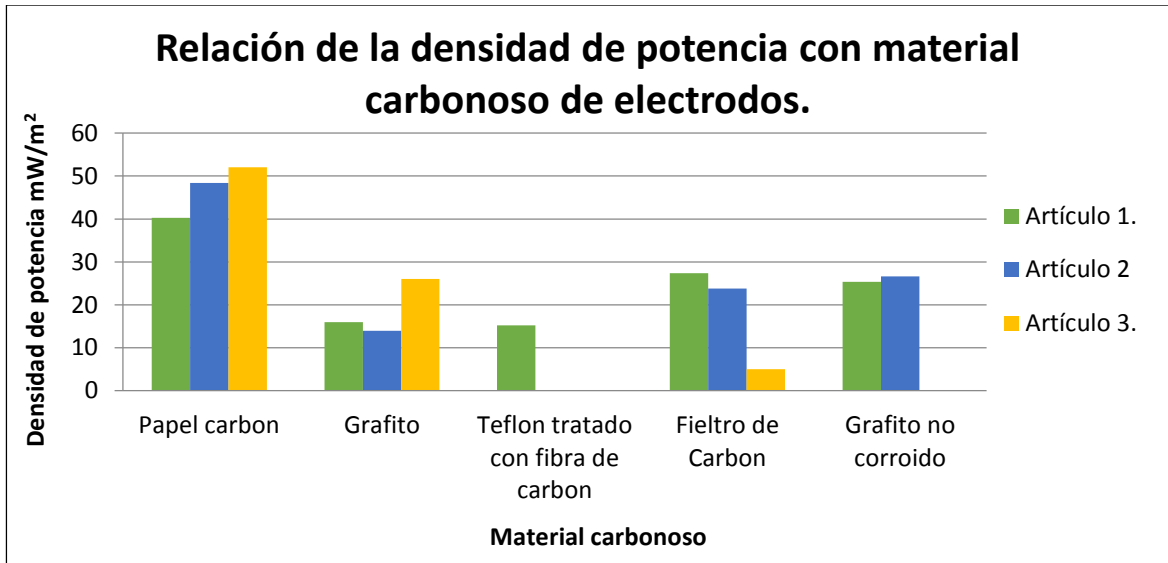
¹³⁹ HELMENSTINE, Anne Marie. Op. cit.

¹⁴⁰ AMSLER, Maximilian, et al. Prediction of a novel monoclinic carbon allotrope. En: EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B -- CONDENSED MATTER. vol. 86, no. 9, p. 1-3

¹⁴¹ RAHIMNEJAD, Mostafa, et al. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. [1]:2015. 745-756

¹⁴² LI, Shuang; CHENG, Chong and THOMAS, Arne. Carbon-Based Microbial-Fuel-Cell Electrodes: From Conductive Supports to Active Catalysts. 2016. 1602547 p.

Gráfico 2. Relación entre materiales carbonos y densidad de potencia alcanzada (mW/m^2) según lo reportado en referentes bibliográficos



3.1.4.3 Resistencia a la temperatura. Los electrodos, al ser parte de las CCM, se ven expuestos a diferentes condiciones de operación, la temperatura es una de estas condiciones; se espera que un electrodo mejore sus propiedades eléctricas con el aumento de la temperatura al ser un material conductor, la capacidad de transporte de energía eléctrica no puede verse afectada por las condiciones de operación de la CCM, así mismo debe soportar altas temperaturas cuando se ve expuesto a procesos de esterilización. Para determinar la resistencia térmica de los materiales empleados para los electrodos en una CCM, se estudia la característica temperatura de servicio, ésta propiedad térmica permite establecer la estabilidad de un material dependiendo el rango de temperatura en el que pueda trabajar. Encontrando según lo reportado en la bibliografía esta característica únicamente para el carbón grafito, que tiene una temperatura de servicio de 3600°C aproximadamente¹⁴³.

Una vez se ha llevado a cabo el estudio de las distintas propiedades de los materiales adecuados para implementar en una CCM como electrodo, se determina que debe ser un material carbonoso, ya que este tipo de materiales, se ha demostrado, es más eficiente en la generación de energía eléctrica, el material carbonoso más adaptable para la configuración de CCM es el grafito, según la **tabla 7**, las propiedades eléctricas del material cumplen con el criterio establecido, este tipo de material permite el paso de energía eléctrica y no afecta de manera negativa el desempeño de la celda. Para el caso de estudio se determina utilizar placas de grafito, existen diversos estudios y reportes en la bibliografía con esta presentación

¹⁴³ MatWeb and Automation Creations. Online . Op. cit.

para el material carbonoso, lo que eventualmente permite relacionar y comparar de acuerdo a los resultados obtenidos, las placas de grafito son compactas por lo que se vuelven manejables y adaptables al tipo de CCM estudiada, es un material con una temperatura de servicio elevada, es decir que las propiedades estudiadas para el grafito no se verán alteradas con el aumento de la temperatura que exigen las condiciones de operación, además permite que el material sea esterilizado a temperaturas mayores de 100°C evitando la formación de biopelícula por parte de los microorganismos en el electrodo para este tipo de material.¹⁴⁴

3.1.5 Material puente de intercambio iónico. El puente de intercambio se determinó de acuerdo a lo reportado en la bibliografía, determinando que existen tres tipos de materiales empleados con mayor frecuencia: Ultrex¹⁴⁵, Nafion¹⁴⁶ y Agar-Agar¹⁴⁷. El puente de intercambio tiene un tipo de clasificación de acuerdo a su objetivo, se dividen en puentes de intercambio iónico (IEM), separadores de tamaño selectivo y puentes salinos¹⁴⁸

3.1.5.1 Composición. De acuerdo a los materiales empleados en la actualidad para la membrana de intercambio protónico se determinó la composición de cada uno con el fin de establecer un criterio de selección apropiado.

- **Ultrex:** se clasifican como membranas de intercambio iónico¹⁴⁹, según la información encontrada en la bibliografía son producidas por *Membranes International Inc.* En el mercado se pueden encontrar como membranas de intercambio aniónico o catiónico, AMI o CMI respectivamente, son un tipo de membrana sintética reforzadas con polipropileno. Su estructura química es desconocida, sin embargo los estudios que se han hecho sobre el material permiten compararla su eficiencia en la implementación de una CCM.
- **Nafion:** es una de las membranas con mayor estudio en aplicación para celdas de combustible microbiana, a razón que también se han empleado en celdas de combustible convencionales, este tipo de membranas son membranas (IEM), es

¹⁴⁴ JAYAPRIYA, J., et al. Preparation and characterization of biocompatible carbon electrodes. [1]:2012. 1329-1335

¹⁴⁵ SOTRES, Ana, et al. Microbial community dynamics in two-chambered microbial fuel cells: Effect of different ion exchange membranes. 2015. 1497-1506 p.

¹⁴⁶ ADJEMIAN, K. T., et al. Silicon Oxide Nafion Composite Membranes for Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Operation at 80-140°C. 2002.

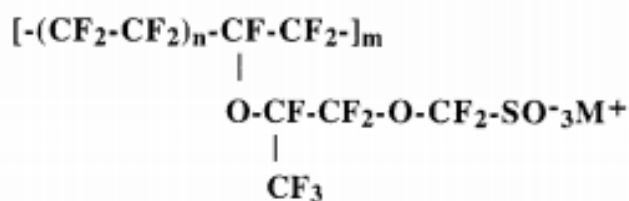
¹⁴⁷ SEVDA, S. and SREEKRISHNAN, T. R. Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND HEALTH. PART A, TOXIC/HAZARDOUS SUBSTANCES & ENVIRONMENTAL ENGINEERING. vol. 47, no. 6, p. 878-886

¹⁴⁸ LI, Wen-Wei, et al. Recent advances in the separators for microbial fuel cells. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 102, no. 1, p. 244-252

¹⁴⁹ HARNISCH, F.; SCHRODER, U. and SCHOLZ, F. The suitability of monopolar and bipolar ion exchange membranes as separators for biological fuel cells. En: ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY. Mar 1. vol. 42, no. 5, p. 1740-1746

decir membranas de intercambio iónico- catiónico, **que con frecuencia también son llamadas membranas de intercambio protónico** ¹⁵⁰. El interés por implementar estas membranas se encuentra en su estructura, el Nafion tiene en su estructura ionómeros, es decir monómeros cargados positiva o negativamente¹⁵¹. Lo que lo vuelve una membrana selectiva y permeable al paso de protones. El Nafion fue desarrollado en 1960, por el Doctor Walther Grot en DuPont como resultado de una modificación del teflón, es un compuesto sulfonado tetrafluoropolimero-copolimero. ¹⁵²En la **Figura 13** se encuentra la estructura química del Nafion. ¹⁵³

Figura 13. Estructura química del Nafion



Fuente: Perma Pure L.L.C. a Halma Company. All about Nafion. [Consultado el 20 de Noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.permapure.com/resources/all-about-nafion-and-faq>

Los ácidos son en general sulfónico o carboxílico, el ion de hidrógeno de los ácidos es quien se intercambia por el catión total o parcialmente¹⁵⁴.

- **Agar-Agar/ Electrolito:** cuando el puente de intercambio está constituido por algún tipo de electrolito se denomina puente salino, permite el intercambio de iones, sin embargo no hace parte de la clasificación¹⁵⁵. En este caso es el electrolito el que se encarga de la conducción de iones de una cámara a otra, el agar previene el intercambio físico de cualquier fluido presente en las cámaras anódicas o catódicas. El agar es un tipo de coloide producto del extracto de algas

¹⁵⁰ GARCA BERNAL, Elena, et al. Tecnología de membranas en Pilas de combustible microbianas.

¹⁵¹ HEITNER-WIRGUIN, Carla. Recent advances in perfluorinated ionomer membranes: Structure, properties and applications. 1996. 1-33 p.

¹⁵² Perma Pure L.L.C. a Halma Company. All about Nafion. [Consultado el 20 de Noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.permapure.com/resources/all-about-nafion-and-faq/>

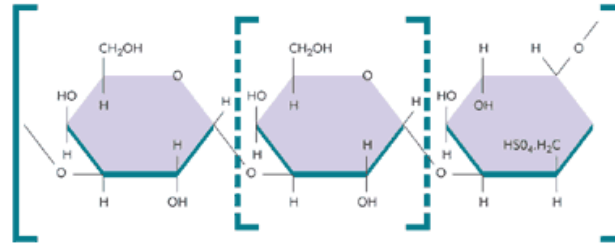
¹⁵³ HEITNER-WIRGUIN, Carla. Op. cit.

¹⁵⁴ HEITNER-WIRGUIN, Carla. Op. cit.

¹⁵⁵ LI, Wen-Wei, et al. Op. cit.

marinas, un polisacárido conformado por agarosa y agarpectina en forma de gel insoluble en agua fría¹⁵⁶ En la figura 14 se encuentra su estructura química.

Figura 14. Estructura química del agar



Fuente: FISHERIES AND AQUACULTURE MANAGEMENT DIVISION FISHERIES AND AQUACULTURE MANAGEMENT DIVISION. Training manual on Gracilaria culture and seaweed processing in China. [Electronic]:China: job number: AB730, 1990. 107

El agar se comporta en el puente salino como un agente gelificante del electrolito, gracias al electrolito contenido en el agar se lleva a cabo el proceso de intercambio iónico permitiendo el paso de protones desde la cámara anódica hasta la cámara catódica. Según lo reportado en la bibliografía la implementación del puente salino en una celda de combustible microbiana se ha estudiado con electrolitos como: KCl¹⁵⁷ y NaCl¹⁵⁸, donde se ha demostrado que la concentración de la sal es un factor clave para la generación de energía eléctrica, el puente salino en comparación con las membranas de intercambio iónico representa alta resistencia interna para una CCM, sin embargo son una alternativa practica y accesible que dependiendo de las condiciones de operación podrían brindar resultados comparables.

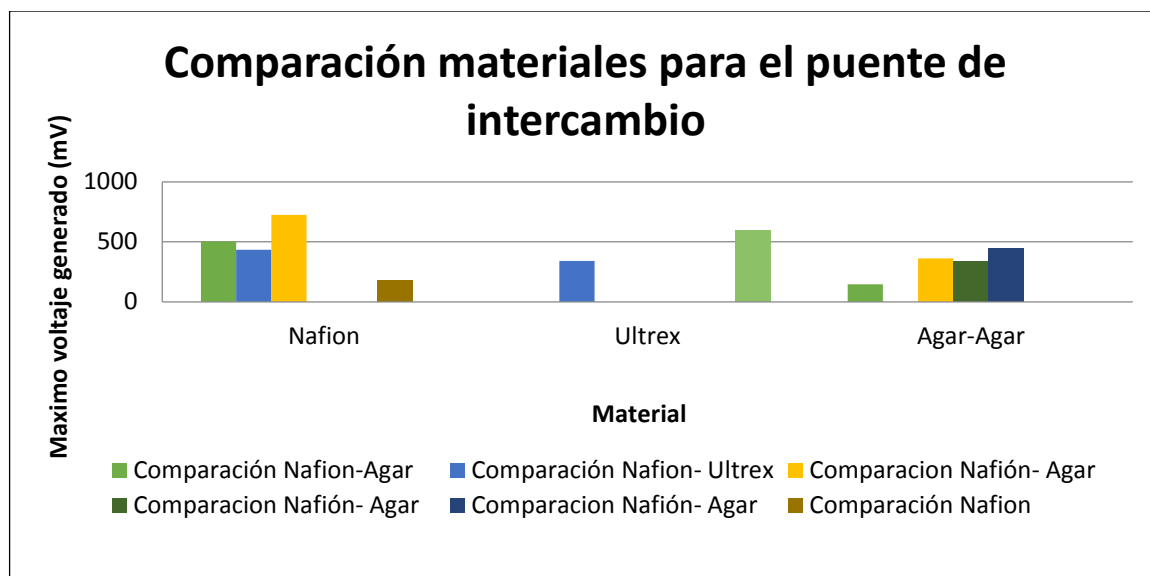
3.1.5.2 Propiedades del material del puente de intercambio. Una vez determinados los materiales más empleados y reportados en las investigaciones sobre celdas de combustible microbiana de dos cámaras, se estudiaron las características de cada uno de ellos y su relación con la producción de energía eléctrica, para posteriormente concluir en la selección del material que se ajustará a criterios como la accesibilidad y generación de energía eléctrica. En la gráfico 3 se compara el tipo de material con la máxima generación de energía eléctrica en (mV)

¹⁵⁶ FISHERIES AND AQUACULTURE MANAGEMENT DIVISION FISHERIES AND AQUACULTURE MANAGEMENT DIVISION. Training manual on Gracilaria culture and seaweed processing in China. [Electronic]:China: job number: AB730, 1990. 107

¹⁵⁷ PARKASH, Anand. Design and Fabrication of a Double Chamber Microbial Fuel Cell for Voltage Generation from Biowaste. 2015.

¹⁵⁸ SEVDA, Surajbhan y SREEKRISHNAN, T. R. Op. cit., p. 878-886

Gráfico 3. Máxima generación de voltaje (mV) en materiales utilizados en el intercambio iónico.



Como se visualiza en el **gráfico 3**, los materiales como el Nafion o el Ultrex son eficaces para su implementación en una CCM, el Agar-Agar con electrolito a pesar de ser puente salino y no una membrana de intercambio iónico es también eficaz en la implementación, éste último es una alternativa para el material de puente de intercambio que cumple con el criterio de accesibilidad, el electrolito empleado puede ser KCl o NaCl, en una investigación realizada por Patil y colaboradores¹⁵⁹ se compara la eficiencia del material Nafion con un Puente salino de agar-agar y KCl a 1M en el tratamiento de un agua residual de la industria de chocolate, donde la generación de energía eléctrica del puente salino con la concentración de electrolito fue apenas menor que la generada por la membrana de intercambio protónico, demostrando que la concentración del electrolito es la que disminuye la resistencia que puede generar la implementación del puente salino para una CCM de doble cámara tipo H; Un estudio similar se lleva a cabo por el autor Abdullah y colaboradores, donde encuentra que la optimización de una CCM de doble cámara con puente salino se puede llevar a cabo estudiando variables como el pH, la temperatura y la concentración de sal, donde el aumento en la concentración de sal es una característica favorable para la generación de energía.¹⁶⁰

3.1.6 Dimensiones de una CCM. Las dimensiones de una CCM se evaluaron con el fin de identificar si son factores influyentes en la generación de energía, entre las

¹⁵⁹ PATIL, Sunil A., et al. Op. cit., 5132-5139

¹⁶⁰ ALSHEHRIA, Abdullah N. Z.; GHANEM, Khaled M. y AL-GARNI, Saleh M. Application of a five level central composite design to optimize operating conditions for electricity generation in a microbial fuel cell. [1]:2016. 797-804

dimensiones a estudiar, se encuentran el volumen de las cámaras de la celda, el área y el volumen de los electrodos, el área de contacto del puente de intercambio con las dos cámaras de la celda, ánodo y cátodo, finalmente, la longitud del puente de intercambio. El diseño de una celda de combustible microbiana debe diseñarse de tal manera que se prevenga la reacción entre el combustible presente en el ánodo y el agente oxidante presente en el cátodo, ya que dicho comportamiento puede afectar la transferencia de electrones a través del circuito.¹⁶¹

3.1.6.1 Volumen de Cámaras. El volumen de las cámaras se determinó según el volumen empleado de sustrato, teniendo en cuenta la CCM se encuentra en escala laboratorio, el volumen de cámaras no sobrepasara los 50 litros en su operación, para este caso el volumen de sustrato es de 800 ml, valor reportado en el trabajo de grado de los autores Medina y Zapata, cabe resaltar que aunque el volumen de las cámaras este directamente relacionado con el volumen del sustrato, dichos valores no pueden ser los mismos ya que si el volumen de cámaras es muy preciso se corre el riesgo de fugas o vertimientos del sustrato que pueden alterar el rendimiento de la celda, por esta razón, se sobreestimó en 200 ml el volumen de cámaras, para obtener un volumen total efectivo de 1 litro y evitar que el funcionamiento de la CCM se vea afectado.

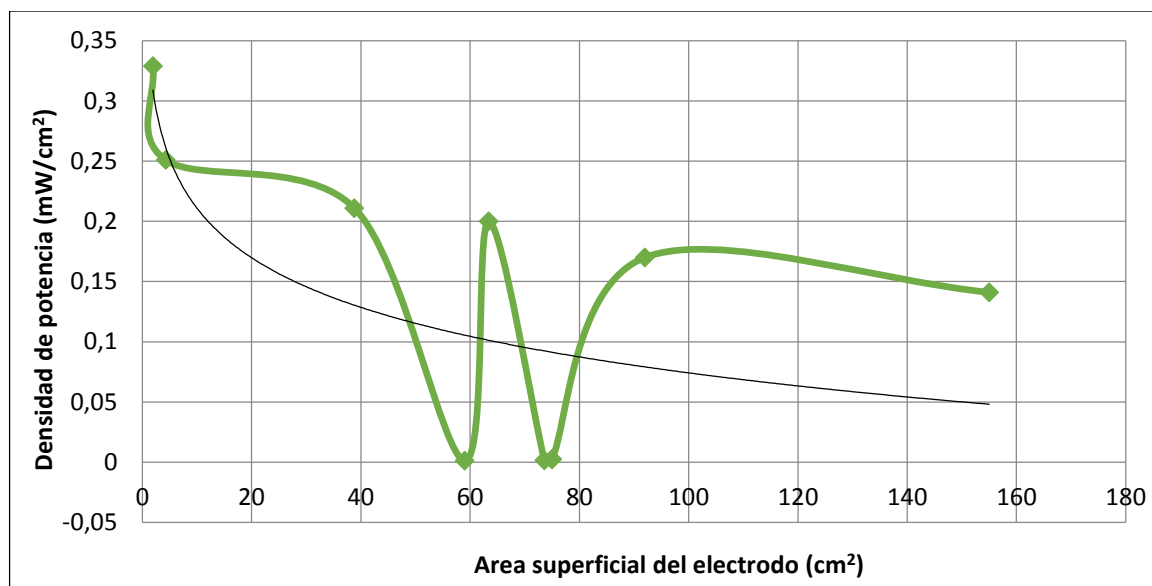
3.1.6.2 Área y volumen de los electrodos. La determinación del área y volumen de los electrodos más adecuado para la configuración de la celda de combustible microbiana es uno de los parámetros con menos reportes en la bibliografía, de acuerdo al autor Santoro¹⁶² el estudio de las celdas de combustible microbiana es un estudio emergente que ha llamado la atención de los investigadores en los últimos 10 a 15 años, por lo que se puede decir que es un estudio reciente, además los prototipos estudiados a escala laboratorio tienen múltiples variaciones en la investigación, las dimensiones de los electrodos es una de ellas, no es posible establecer algún tipo de relación veraz o directa entre las dimensiones y la generación de energía eléctrica, a razón que no existe continuidad de la investigación con parámetros establecidos de manera similar.

En el gráfico 4, se encuentra la relación entre los dos parámetros mencionados de acuerdo a lo reportado hasta el momento en la bibliografía bajo condiciones similares a las establecidas.

¹⁶¹ ERABLE,B., et al. Single medium microbial fuel cell: Stainless steel and graphite electrode materials select bacterial communities resulting in opposite electrocatalytic activities. [1]:2017. 26059-26067

¹⁶² SANTORO,Carlo, *et al.* Op. cit.,225-244

Gráfico 4. Relación entre la densidad de potencia (mW/cm^2) y el área superficial del electrodo (cm^2)



Como se puede determinar con el gráfico 4, la relación de las dos variables estudiadas no es directa o de tipo lineal, sin embargo con la línea de tendencia logarítmica es posible identificar cierto tipo de relación infiriendo que a mayor área superficial del electrodo la densidad de potencia es menor, caso contrario cuando el área superficial del electrodo es menor.^{163,164,165}

Según el estudio del autor Dewan¹⁶⁶, el escalado de una celda de combustible microbiana se basa en primera instancia en los resultados a escala laboratorio; sin embargo en la actualidad existen múltiples preguntas y variables que se deben determinar para generar unanimidad¹⁶⁷. A razón de lo anterior, las dimensiones de los electrodos en una CCM generadora de energía eléctrica fueron similares a los estudiado inicialmente en el trabajo de investigación “*evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio*” de los autores Sergio Andrés Medina Mesa y María Julieta Zapata Rojas llevada a cabo en el grupo de investigación de energías alternativas en la Fundación Universidad de América.

¹⁶³ GIL, Geun-Cheol, et al. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. [1]:2003. 327-334

¹⁶⁴ ZHOU, Minghua, et al. Bioelectrochemistry of Microbial Fuel Cells and their Potential Applications in Bioenergy. 2014. 131-152 p.

¹⁶⁵ RAHIMNEJAD, Mostafa, et al. Op. cit., p. 1585-1588

¹⁶⁶ DEWAN, Alim; BEYENAL, Haluk and LEWANDOWSKI, Zbigniew. Op. cit. p. 7643-7648

¹⁶⁷ DEWAN, Alim; BEYENAL, Haluk and LEWANDOWSKI, Zbigniew. Op. cit. p. 7643-7648

Con base en el estudio descrito anteriormente se determinaron las dimensiones de los electrodos de la siguiente manera:

Área superficial de los electrodos= 78 cm²

Área de los electrodos= 28 cm²

Volumen de los electrodos= 28 cm³

3.1.6.3 Área de contacto del puente de intercambio de protones. De acuerdo a lo mencionado anteriormente el puente de intercambio es un tipo de membrana que permite el paso de los iones (H⁺) de la cámara anódica a la cámara catódica, para la determinación del área de contacto del puente se relacionó dicho parámetro con la potencia producida por la celda, con el fin de seleccionar el área de contacto más apropiada y que se ajuste a las especificaciones de diseños de la celda.

Según la investigación realizada por Logan y OH¹⁶⁸, se determina que el funcionamiento y rendimiento de una CCM se relaciona con el área superficial de la membrana de intercambio y con el área superficial de los electrodos empleados. En el artículo mencionado los autores evalúan el rendimiento de la celda al usar tres áreas superficiales diferentes de puente de intercambio con electrodos de un área específica establecida, las áreas del puente que se evaluaron corresponden a valores de 3,5; 6,5 y 30,6 cm² siendo el área de 30,6 cm² la que mejor resultados obtuvo en experimentación generando una densidad de potencia máxima de 190 mW/m², lo que lleva a concluir que a mayor área de contacto del puente de intercambio con las cámaras, el rendimiento de la celda mejorara notablemente.

Ahora bien, en el artículo ya mencionado los autores establecen una relación para estimar el valor máximo de potencia generada por la celda, relación que se encuentra en función de las áreas superficiales de los electrodos y del puente de intercambio, la ecuación 15 muestra dicha relación.

Ecuación 15. Potencia máxima de la celda en función del área de los electrodos y el área del puente de intercambio

$$P = \frac{A_{PEM}}{10.000} * \frac{126.6 * \left(\frac{A_{cat}}{A_{PEM}}\right)^{0,439}}{1 + (0,155 * \left(\frac{A_{PEM}}{A_{an}}\right)^{2.45}}$$

Donde:

A_{PEM} = Área de contacto del puente de intercambio en cm²

A_{cat} = Área superficial del electrodo del cátodo en cm²

¹⁶⁸ OH, Sang-Eun y LOGAN, Bruce E. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 70, no. 2, p. 162-169

A_{an} = Área superficial del electrodo del ánodo en cm^2

3.1.6.4 Longitud puente de intercambio protónico. La determinación de la dimensión longitud del puente de intercambio protónico se llevó a cabo de acuerdo al criterio: distancia entre los electrodos.

De acuerdo a la investigación del autor BUITRÓN y colaboradores¹⁶⁹, se determina que la distancia entre los electrodos no causa un efecto significativo en la generación de energía eléctrica, para este caso se dispone una separación entre los electrodos de 2.8 cm, 5.5 cm y 8.2 cm, donde el voltaje máximo generado por la CCM fue de 540 mV, 523mV y 620 mV respectivamente, esto permite inferir que la separación entre los electrodos a pesar de ser un parámetro importante en la geometría y configuración de una celda de combustible microbiana no interfiere de manera significativa en la eficiencia.

En el artículo de CHENG y colaboradores¹⁷⁰, se determina que la disminución del espacio entre los electrodos se relaciona con la resistencia interna de la CCM, sin embargo la determinación de materiales, modo de operación, configuración de la CCM, y el tipo de carga orgánica brindada para el microorganismo son factores más relevantes al momento de implementar la tecnología en diferentes tipos de agua residual. Los autores recomiendan llevar a cabo el estudio del efecto de la distancia de los electrodos en otro tipo de configuración de CCM determinando densidad de potencia y densidad de corriente para implementar el mejor diseño.

Por otra parte, el autor GUATO SUN y colaboradores¹⁷¹, determinan que para maximizar la eficiencia de una celda de combustible microbiana se deben estudiar variables como el material de los electrodos, afirmando que la distancia entre los electrodos no tienen relación con la formación de la biopelícula que es una característica importante en la generación de energía eléctrica a partir de la acción metabólica de los microorganismos.

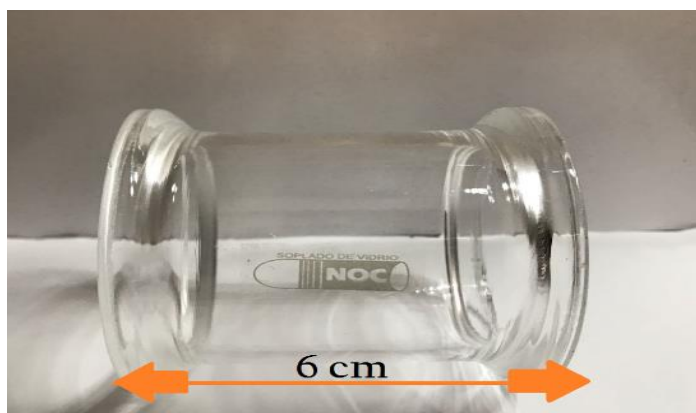
Una vez determinado que la separación entre los electrodos no será un parámetro influyente en la eficiencia de la CCM implementada se determina una longitud de puente promedio de acuerdo a los estudiado por el autor BUITRÓN y colaboradores, de 3 a 8 cm determinando que la dimensión debe ser la más adaptable al tipo de configuración escogida, con el fin de alcanzar la eficiencia máxima de la celda de combustible microbiana. Se determina una longitud de 6 cm para la CCM implementada.

¹⁶⁹ BUITRÓN, Germán y PÉREZ,Jaime. Op. cit., p. 5

¹⁷⁰ CHENG,Shaoan; LIU,Hong andLOGAN,Bruce. Increased Power Generation in a Continuous Flow MFC with Advective Flow through the Porous Anode and Reduced Electrode Spacing. 2006. 2426-32 p.

¹⁷¹ SUN,Guotao, et al. Op. cit. p. 2415-2427

Figura 15. Longitud del puente de intercambio protónico.



3.2 INSTRUMENTACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

3.2.1 Instrumentación empleada para el control de las variables de proceso.

De acuerdo a las condiciones de operación de la celda se determinaron las principales variables que determinan el funcionamiento de la CCM.

3.2.1.1 Sensor de temperatura. Se realizó un estudio de tres tipos de sensor de temperatura comunes, cuando se emplea un sensor, las señales que este dispositivo brinda son señales analógicas, lo que indica que son señales que no son constantes por ende, tienen un cambio a medida que pasa el tiempo. En el funcionamiento de las CCM la temperatura es un parámetro que se debe monitorear constantemente, debido a que se relaciona directamente con el rendimiento de la celda.

En la medición de temperatura se pueden emplear diferentes instrumentos que utilizan para su medición diferentes fenómenos, tales como, variaciones de volumen, resistencia, voltaje, corriente, entre otros para medir la temperatura. Para llevar a cabo la determinación del sensor de temperatura se estudiaron los sensores más usados industrialmente. Existen tres tipos comunes de sensores, las termo resistencias (RTD), las termocuplas o termopar y los termistores.¹⁷² La tabla 8, describe las principales características de cada sensor con sus respectivas ventajas y desventajas.

¹⁷² DESMARAIS,Ron y BREUER,Jim. How to Select and Use the Right Temperature Sensor. En: SENSORS MAGAZINE. Jan 1,vol. 18, no. 1, p. 24

Tabla 8. Tipos de sensores de temperatura.

Sensor	Características	Ventajas	Desventajas
“Termo resistencias (RTD)” ^{173,174}	<p>Mide la temperatura usando sondas de resistencia, relaciona la variación de la resistencia para estimar la temperatura.</p> <p>Los termo-resistencia usualmente se fabrican de platino u otros metales como níquel o cobre.</p> <p>Rango de medición: - 270 °C hasta 850°C</p>	<p>Son estables y precisos en su medición.</p>	<p>Instrumentos con mayor costo que las termocuplas o termopares.</p> <p>Requiere de una fuente de alimentación.</p> <p>Se pueden auto calentar.</p>
“Termocuplas” ^{175,176}	<p>Funcionan según el principio termo eléctrico.</p> <p>Consiste en la unión de dos metales los cuales se encuentran unidos en un extremo y separados en el otro. La medición de temperatura se encuentra en función del voltaje.</p>	<p>Sensor más empleado. Bajo coste, recorre largas distancias y son resistentes. Diversidad de tipos de termocuplas, los cuales pueden cubrir amplio rango de temperatura de operación.</p>	<p>Las medidas de voltajes son bajas, ocasionando ruido en la medida. No es un sensor lineal.</p>

¹⁷³ Ibid.

¹⁷⁴ CREUS SOLÉ, Antonio. Op. cit.

¹⁷⁵ DESMARAIS. Op. cit., p. 24

¹⁷⁶ Keysight Technologies; How to Select the Correct and Temperature Sensor. Keysight Technologies How to Select the Correct Temperature Sensor. [1]:

Tabla 8. (Continuación)

Sensor	Características	Ventajas	Desventajas
"Termistores" ^{177,178}	Semiconductores electrónicos, al igual que las RTD la temperatura está en función de los cambios de resistencia. Tienen coeficiente de temperatura negativo, es decir a medida que aumenta la resistencia eléctrica la temperatura disminuye. Fabricados con óxidos de hierro, níquel magnesio u otros metales semiconductores.	Poseen mayor sensibilidad que las RTD, es decir la respuesta a los cambios de temperatura serán más rápidos. Son sensores simples de configurar y operar	El rango de temperatura en el que trabajan es limitado, son poco resistentes. Es un sensor con baja linealidad. Pueden tener problemas de des calibración.

En la tabla 8, se identificaron las principales características de los sensores usados con mayor frecuencia industrialmente, para la selección del sensor de temperatura se estudiaron características como, resistencia a la corrosión, material de fabricación del sensor, sensibilidad en la medición, estabilidad en la medida y bajo coste, a fin de no alterar el crecimiento microbiano y en consecuencia la eficiencia de la celda. Se selecciona la termocupla debido a que este tipo de sensor cumple con gran parte de las características mencionadas, en primer lugar este tipo de sensor puede recorrer distancias hasta aproximadamente 10 metros del lugar de medición y no alterar el valor de las variables medidas, así mismo el material de los alambres de las termocuplas, permiten que este sensor tenga alta resistencia a la corrosión, oxidación y reducción. Por otro lado, las termocuplas miden la temperatura en función del voltaje de manera lineal, es decir que al aumentar la temperatura en los alambres metálicos que componen el instrumento el voltaje aumenta. A pesar que se genere un voltaje pequeño en la medida, esta característica es un factor importante en el proceso de las CCM debido a que el voltaje es una de las propiedades eléctricas monitoreadas durante el proceso.¹⁷⁹

De acuerdo a las condiciones de operación de la CCM se determinó que la temperatura de operación del proceso oscila entre 45 °C y 28 °C, por esta razón la

¹⁷⁷ *Ibíd.*

¹⁷⁸ CREUS SOLÉ, Antonio. Op. cit.

¹⁷⁹ CREUS SOLÉ, Antonio. Op. cit.

termocupla seleccionada fue la **LM 35** la cual maneja un rango de medida desde -55°C hasta 150 °C. Esta termocupla maneja una salida lineal, por ende, cada grado centígrado equivale a 10 mV, a diferencia de otro tipo de sensores, la LM 35 se encuentra calibrada para realizar las medidas en grados centígrados, finalmente este sensor es de bajo coste y maneja buena precisión en la toma de datos, alrededor de 1°C.

3.2.1.2 pH-metro. Para realizar las mediciones del valor del pH se hizo uso de un pH-metro digital 009 (I)A, el cual maneja rangos de pH entre 0 a 14, con una resolución en la medida de 0.1 y operando en un rango de temperaturas de 0°C hasta aproximadamente 50°C.

Como se mencionó en el apartado 2.2.1.2 el control del pH se debe llevar a cabo teniendo en cuenta el proceso metabólico generado por las bacterias para producir energía. Las mediciones del pH a lo largo del proceso se ven alteradas por la existencia de la membrana de intercambio de protones, ésta última crea una barrera en el transporte y el intercambio anión – catión causando un enlentecimiento en el proceso donde la producción y consumo de protones en el ánodo y cátodo respectivamente generando una diferencia de pH.¹⁸⁰

3.2.1.3 Multímetro. El multímetro es el instrumento que permite llevar a cabo las mediciones de voltaje, y demás magnitudes eléctricas previamente enunciadas. Para llevar a cabo las mediciones se empleó un multímetro digital DT830D que permite medir voltaje AC y DC, corriente DC, resistencia Ω y temperatura, empleando una velocidad de muestra de 2 veces por segundo.

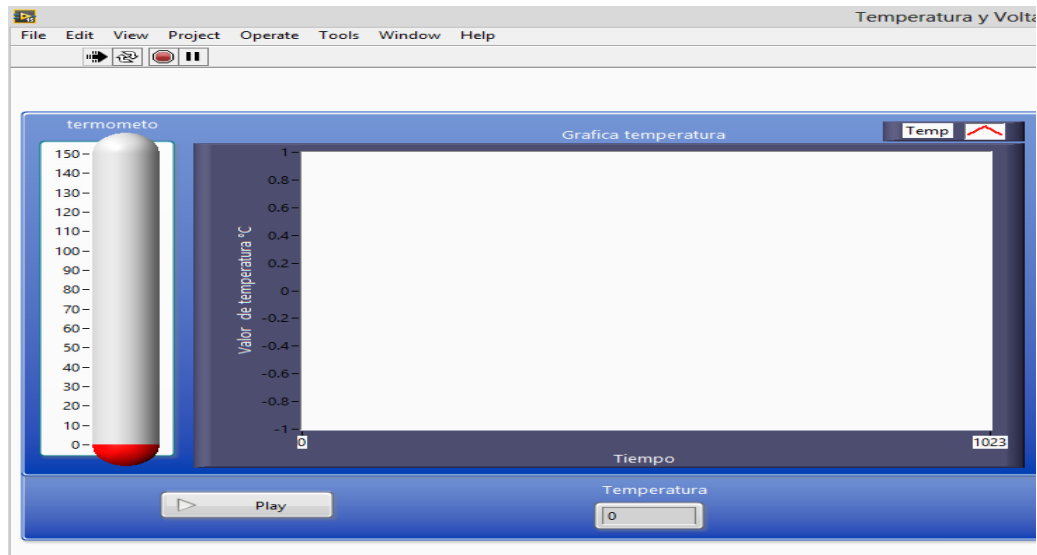
3.2.2 Software de instrumentación virtual. Para la determinación del *Software* de datos adecuado se tuvieron en cuenta los criterios de accesibilidad y compatibilidad con la instrumentación empleada. El *Software* que se seleccionó es *LabView* (*laboratory virtual instrument engineering workbench*), creado por *National Instruments*, es un *Software* empleado en la ingeniería que permite llevar a cabo la medición, control y análisis de datos, el programa maneja un ambiente programación simple visualizando los resultados de acuerdo a la adquisición de datos implementada, maneja un lenguaje de programación gráfico, trabaja bajo sistemas operativos como Microsoft Windows, Mac OS X y GNU/Linux, el resultado final es un instrumento virtual donde, para este caso, se pueden visualizar los valores de las variable temperatura a lo largo del tiempo para una CCM¹⁸¹.

¹⁸⁰ DU,Z.; LI,H. y GU,T. Op. cit., p. 464-482

¹⁸¹ National Instruments. *LabView*. [Consultado el 16 de Noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.ni.com/es-co.html>

- Panel frontal: en el panel frontal de *Software LabView* es donde se lleva a cabo la interfaz usuario-*Software*, para la implementación de la instrumentación seleccionada de acuerdo a las variables medidas temperatura y voltaje, en la figura 16 se ilustra el panel frontal desarrollado:

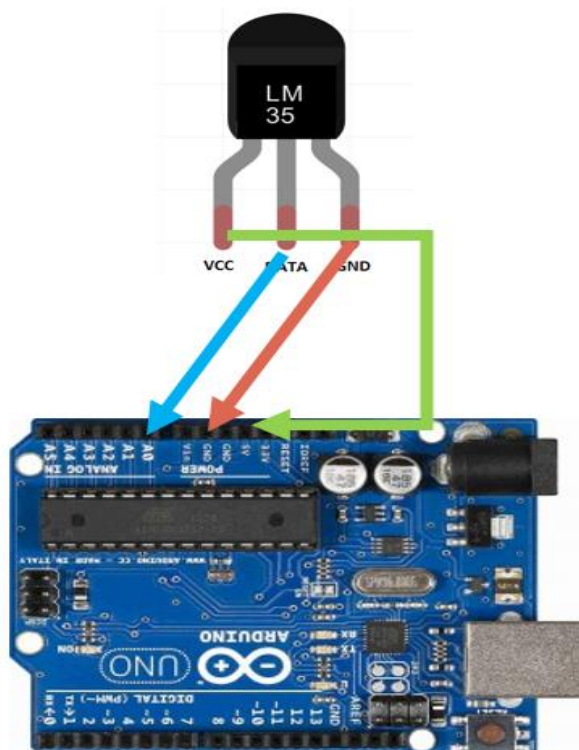
Figura 16. Panel frontal medición variables voltaje y temperatura.



De acuerdo a la figura 16, se puede encontrar que en esta parte de la programación se visualizan los controles e indicadores requeridos para el programa, para este caso existe un indicador en la parte inferior de la sección de gráfico, donde el eje Y es la variable dependiente, temperatura, y el eje X es tiempo.

- Diagrama de bloques: en el diagrama de bloques se lleva a cabo la programación propia del *Software*, se definen las entradas y salidas del sistema, así como las conexiones respectivas. En la figura 17 se establece la programación respectiva.

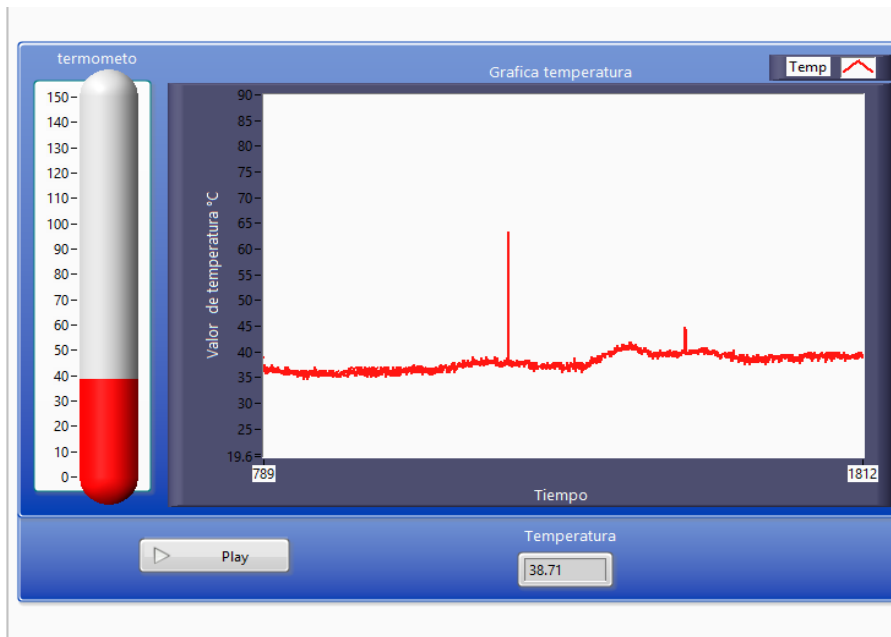
Figura 18. Conexión sensor de temperatura con el Hardware Arduino.



De acuerdo a lo ilustrado en la figura 18, el sensor LM35 tiene tres tipos de salidas, la primera salida, verde, se conecta al puerto de entrada análogo del *Hardware Arduino*, recordando que la señal generada por el sensor es de tipo análoga, el puerto para este caso es el A1, la segunda salida, azul, es el polo a tierra del sensor, se conecta en el puerto GND, la última salida, rojo, se conecta al puerto 5V, el *Hardware Arduino*, no genera voltajes mayores a este valor, se conoce que una CCM genera medidas de voltajes menores a 5V, por lo que tanto el sensor como el *Hardware* se adaptan a los criterios establecidos.

El software de instrumentación virtual permitió monitorear la temperatura en un tiempo de 30 horas para las dos cepas estudiadas con el fin de estudiar la influencia de la variable en la generación de energía eléctrica para la celda de combustible microbiana implementada, en la figura 19, se ilustra el comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso para la cepa *Escherichia coli* con el *Software* de instrumentación virtual

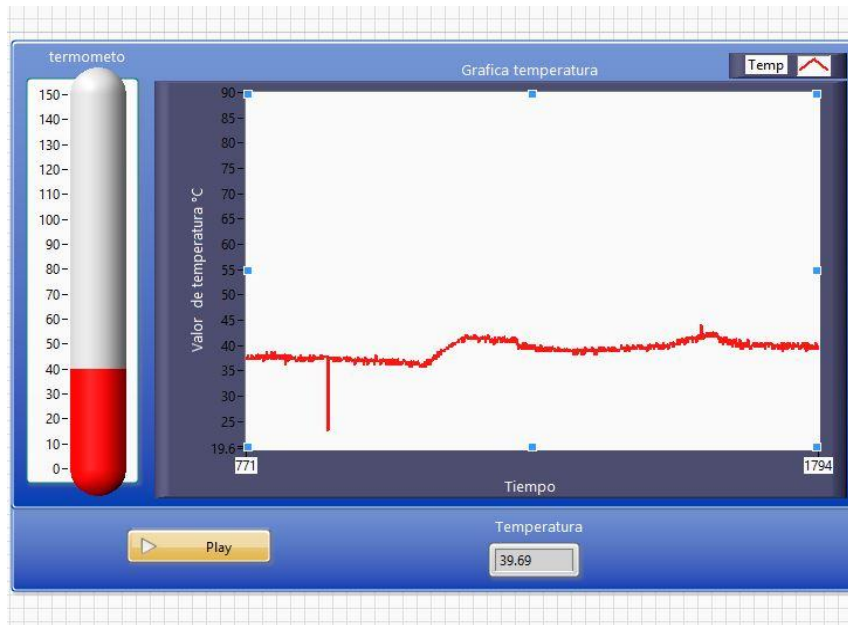
Figura 19. Comportamiento de la temperatura en la generación de energía eléctrica para *Escherichia coli*.



De acuerdo a la figura 19, se puede decir que el comportamiento de la temperatura durante las 30 horas es relativamente estable lo cual favorece al crecimiento de las bacterias, recordando que las dos cepas estudiadas son microorganismos mésófilos de acuerdo su clasificación de crecimiento según la temperatura, es decir, son microorganismos que llevan a cabo un crecimiento óptimo en rangos de temperatura cercanos a 37°C, en la tabulación de los datos exportados a Excel expuestos en el Anexo C se determina que de acuerdo a las mediciones del software el rango de temperatura en promedio es cercano a la temperatura óptima de crecimiento para el microorganismo mencionado. Así mismo, se determinó que la termocupla LM35 es sensible a cualquier tipo de perturbación afectando la toma de datos, dichas perturbaciones se pueden observar en la figura 20, por lo tanto, para evitar inconsistencias en la toma de datos se debería estudiar otro tipo de termocupla compatibles con la programación donde la sensibilidad sea menor, asegurando una toma de datos eficaz.

En la figura 20, se ilustra, de la misma forma el comportamiento para *Pseudomonas aeruginosa* en el mismo tiempo de operación con el Software de instrumentación virtual

Figura 20. Comportamiento de la temperatura en la generación de energía eléctrica para las *Pseudomonas aeruginosa*.



En el caso de *Pseudomonas aeruginosa*, las perturbaciones en el proceso son evidentes, sin embargo se puede decir que la estabilidad en la temperatura durante la primera parte de la experimentación fue relativamente estable; Sin embargo; en las últimas horas del proceso el *Software* ilustra temperaturas más altas en comparación con la temperatura óptima de crecimiento (37°C) lo que puede llegar a influir en la generación de energía eléctrica por parte del microorganismo.

3.2.3 Condiciones de uso y ensamble de la celda de combustible microbiana

En el Anexo A, se encuentra el manual de instrucciones donde se establecen las condiciones de uso y el correcto ensamblaje de la celda de combustible microbiana para futuras investigaciones. El procedimiento para realizar el correcto ensamble de la celda de combustible microbiana se ilustra en el Diagrama 1.

Diagrama 1. Ensamble de la CCM

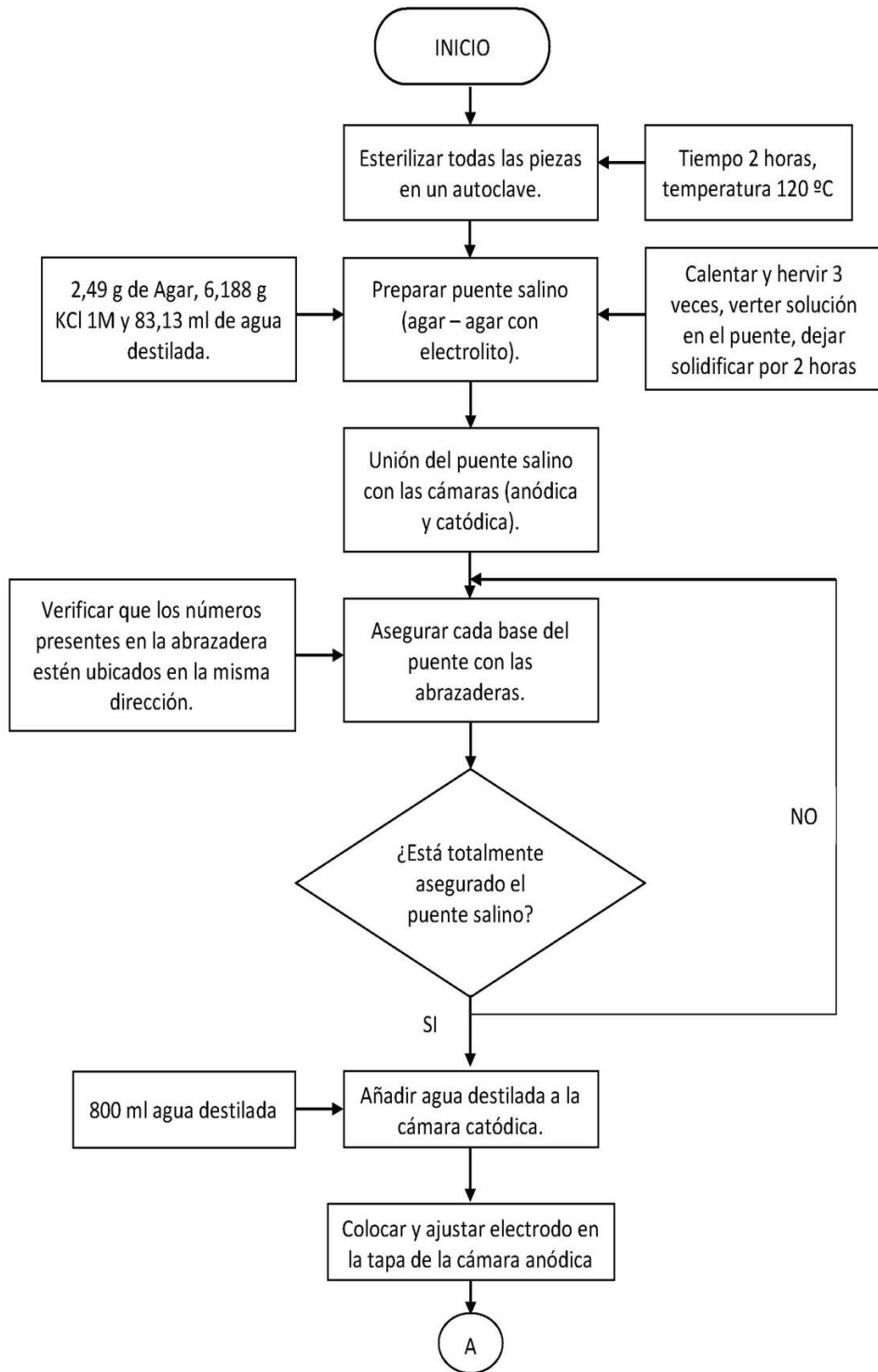
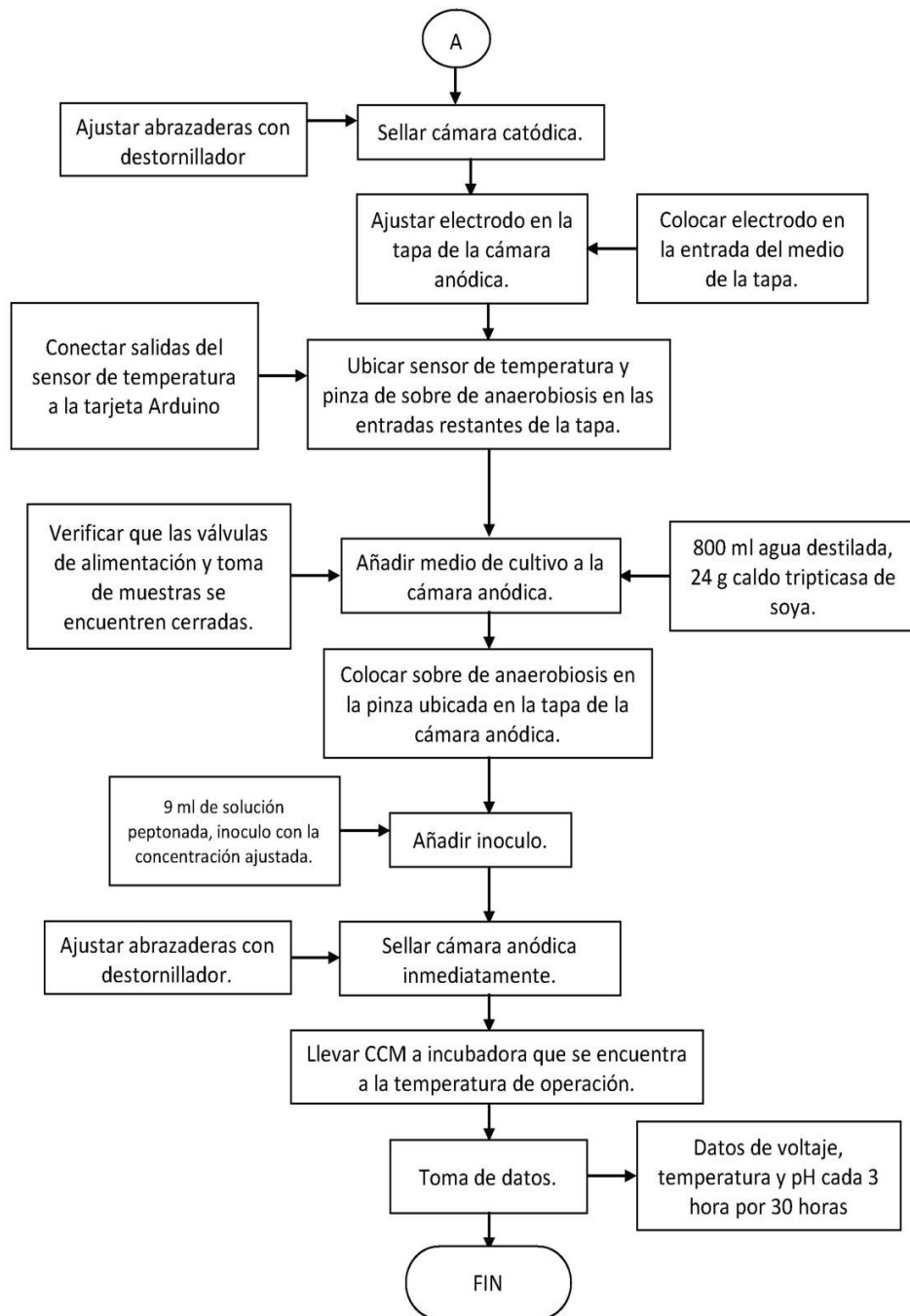


Diagrama 1. (Continuación)



Por otra parte, en el Anexo B, se encuentran los planos del equipo junto con cada uno de los elementos que lo componen llevados a cabo en el *Software* CAD, Autodesk Inventor Professional 2017 siguiendo el estándar de las normas ISO para el dibujo técnico.

3.3 EFICIENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA Y EVALUACIÓN DEL DQO

3.3.1 Producción de energía eléctrica de CCM implementada. De acuerdo a los resultados obtenidos previamente, se implementó una celda de combustible microbiana de dos cámaras tipo H para la generación de energía eléctrica; La estimación de la producción de energía de la CCM se realizó con 2 corridas experimentales, relacionando las dos bacterias, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. La experimentación realizada se llevó a cabo por 30 horas, donde se tomaron mediciones del voltaje, intensidad de corriente eléctrica y pH en un intervalo de 3 horas, por medio del *Software* de instrumentación virtual seleccionado especificado en el apartado 3.2.2, se logró monitorear la temperatura durante todo el tiempo de operación, datos que se obtienen con el fin de analizar la influencia de la temperatura en la generación de energía, la recolección de datos de cada corrida experimental monitoreando la temperatura de cada hora durante el tiempo de operación se encuentran reportados en el Anexo C; de acuerdo a los resultados obtenidos se determinó que la CCM trabaja a una temperatura promedio de 37,9702°C para el caso de la *Escherichia coli* y una temperatura promedio de 38,3138 °C para el caso de las *Pseudomonas aeruginosa*. El promedio de la temperatura permite determinar el comportamiento de la variable durante las 30 horas de la corrida experimental teniendo en cuenta que existe un gran número de datos recolectados durante el determinado tiempo.

Los resultados experimentales de las 2 pruebas se relacionan en las tablas 9 para la *Escherichia coli* y la tabla 10 para las *Pseudomonas aeruginosa*. En el gráfico 5, se relaciona el comportamiento del voltaje para las dos bacterias estudiadas a lo largo del tiempo, 30 horas de la misma manera en el Anexo C. Se muestran los resultados obtenidos de la temperatura medidos por el *Software* de instrumentación virtual en un intervalo de 60 minutos durante el tiempo de operación de la CCM para las cepas seleccionadas.

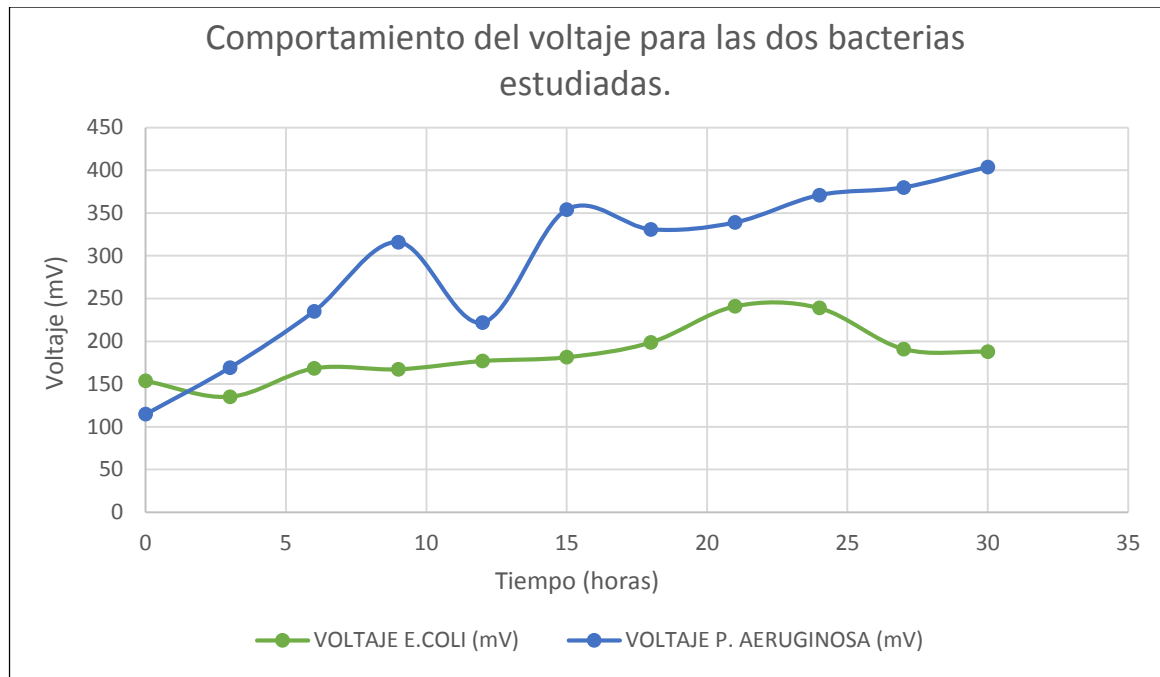
Tabla 9. Resultados experimentales de la *Escherichia coli*.

Corrida	Hora	Voltaje (mV)	Intensidad (μ A)	pH
1	0	153,6	106	7,3
2	3	135	89	7
3	6	168,3	97	6,9
4	9	167,2	79	6,6
5	12	176,9	68	6,4
6	15	181,3	74	6,1
7	18	198,7	95	5,9
8	21	241	104	6
9	24	239	101	5,9
10	27	191	94	5,7
11	30	187,8	90	5,7
Promedio		185,44	90,64	6,3

Tabla 10. Resultados experimentales de las *Pseudomonas aeruginosa*.

Corrida	Hora	Voltaje (mV)	Intensidad (μ A)	pH
1	0	114,7	28	7,3
2	3	169,2	181	7,2
3	6	235	264	6,9
4	9	316	349	6,7
5	12	222	304	6,4
6	15	354	383	6,3
7	18	331	282	5,7
8	21	339	290	5,8
9	24	371	230	6
10	27	380	267	5,9
11	30	404	258	6,2
Promedio		294,17	257,82	6,4

Gráfico 5. Comportamiento del voltaje en un tiempo de 30 horas para las bacterias estudiadas.



En el gráfico 5, se presenta el comportamiento de voltaje durante el tiempo de operación para las dos cepas estudiadas, es evidente que las *Pseudomonas aeruginosa*, poseen una mayor capacidad para la producción de energía, ahora bien, como se ha mencionado anteriormente el funcionamiento de las CCM se puede desarrollar haciendo uso de dos tipos de bacterias, en primer lugar están las bacterias que pueden realizar una transferencia directa o indirecta de electrones al ánodo sin usar ningún tipo de mediador, bacterias exoelectrógenas, por otro lado, se encuentran las bacterias que necesitan del uso de un mediador sintético o natural para realizar la transferencia de electrones. La *P. aeruginosa* es un tipo de bacteria exoelectrogénica, que transfiere los electrones de forma indirecta al ánodo, es decir, esta bacteria puede excretar una serie de metabolitos secundarios los cuales son los encargados de transferir los electrones al ánodo, la *P. aeruginosa* puede generar metabolitos secundarios tales como la piocianina (PYO) y 1-hidroxi-fenazina (OHPHZ), metabolitos que se encuentran activos para realizar el proceso redox y transferir los electrones hacia el ánodo, la eficiencia de emplear la *P. aeruginosa* en CCM se da por la cantidad de metabolitos secundarios que esta bacteria pueda excretar.¹⁸²

Por otro lado, las *Escherichia coli* para realizar la transferencia de electrones desde el interior de la célula hacia el ánodo requiere el uso de mediador artificiales tales

¹⁸² QIAO, Yan, et al. Real-time monitoring of phenazines excretion in *Pseudomonas aeruginosa* microbial fuel cell anode using cavity microelectrodes. [1]:2015. 1-6

como rojo neutro, azul de metileno y tionina, esta cepa es no exoelectr6gena por naturaleza.¹⁸³ Este tipo de bacterias no realizan la transferencia de electrones directa debido a que no poseen prote6nas de membrana conductoras, citocromos externos o pilis que les permita realizar este proceso, a diferencia de cepas como *Shewanella* y *Geobacter*. Sin embargo, de acuerdo a estudios realizados, la cepa *Escherichia coli* puede tener contacto directo con el exterior, en este caso el 6nodo, por medio de las porinas las cuales permiten que ciertas mol6culas se transporten a trav6s de ellas, por ende un mayor contenido de porinas en la membrana externa de la c6lula de las *Escherichia coli* permitir6 un mejor desempe1o en la producci3n de corriente y energ6a.¹⁸⁴

Una vez terminadas las 2 pruebas experimentales y de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.3.1 se determinan los par6metros que permiten evaluar la producci3n de energ6a el6ctrica de la CCM, se realiz3 el c6lculo de la densidad de corriente, la potencia y la densidad de potencia, la tabla 11 presenta los resultados obtenidos para las dos cepas seleccionadas.

Tabla 11. Resultados de los par6metros de producci3n de energ6a en la CCM para la *Escherichia coli*.

Tiempo (h)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Densidad de corriente (A/m ²)	Densidad de potencia (W/m ²)
0	0,1536	0,000106	0,00001628	0,01359	0,002087
3	0,1350	0,000089	0,00001202	0,01141	0,001540
6	0,1683	0,000097	0,00001633	0,01244	0,002093
9	0,1672	0,000079	0,00001321	0,01013	0,001693
12	0,1769	0,000068	0,00001203	0,00872	0,001542
15	0,1813	0,000074	0,00001342	0,00949	0,001720
18	0,1987	0,000095	0,00001888	0,01218	0,002420
21	0,2410	0,000104	0,00002506	0,01333	0,003213
24	0,2390	0,000101	0,00002414	0,01295	0,003095
27	0,1910	0,000094	0,00001795	0,01205	0,002302
30	0,1878	0,000090	0,00001690	0,01154	0,002167
Promedio	0,1854	9,06E-05	0,00001693	0,01162	0,002170

¹⁸³ NANDY, Arpita; KUMAR, Vikash and KUNDU, Patit P. Effect of electric impulse for improved energy generation in mediatorless dual chamber microbial fuel cell through electroevolution of *Escherichia coli*. [1]:2016. 796-801

¹⁸⁴ SUGNAUX, Marc, et al. Probing electron transfer with *Escherichia coli*: A method to examine exoelectronics in microbial fuel cell type systems. [1]:2013. 567-573

Tabla 12. Resultados de los parámetros de producción de energía en la CCM para las *Pseudomonas Aeruginosa*.

Tiempo (h)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Densidad de corriente (A/m ²)	Densidad de potencia (W/m ²)
0	0,1147	0,000028	3,212E-06	0,00359	0,00041
3	0,1692	0,000181	3,063E-05	0,02321	0,00393
6	0,2350	0,000264	6,204E-05	0,03385	0,00795
9	0,3160	0,000349	1,103E-04	0,04474	0,01414
12	0,2220	0,000304	6,749E-05	0,03897	0,00865
15	0,3540	0,000383	1,356E-04	0,04910	0,01738
18	0,3310	0,000282	9,334E-05	0,03615	0,01197
21	0,3390	0,000290	9,831E-05	0,03718	0,01260
24	0,3710	0,000230	8,533E-05	0,02949	0,01094
27	0,3800	0,000267	1,015E-04	0,03423	0,01301
30	0,4040	0,000258	1,042E-04	0,03308	0,01336
Promedio	0,2942	0,000258	8,108E-05	0,03305	0,01040

Muestra de cálculo: se realizó la muestra de cálculo de los parámetros de producción de energía para la primera prueba de la bacteria *Escherichia coli*, como se determinó en el apartado 3.1.6.2 el área del electrodo tiene un valor de 78 cm², a su vez los valores de voltajes e intensidad se obtuvieron por los equipos ya mencionados en el apartado 3.2.1.3.

Potencia:

$$P = V * I$$

$$P = (0,1536 V)(0,000106 A) = 0,00001628 W$$

Densidad de corriente:

$$J = \frac{I}{a}$$

$$J = \frac{0,000106}{0,0078 m^2} = 0,01359 \frac{A}{m^2}$$

Densidad de potencia:

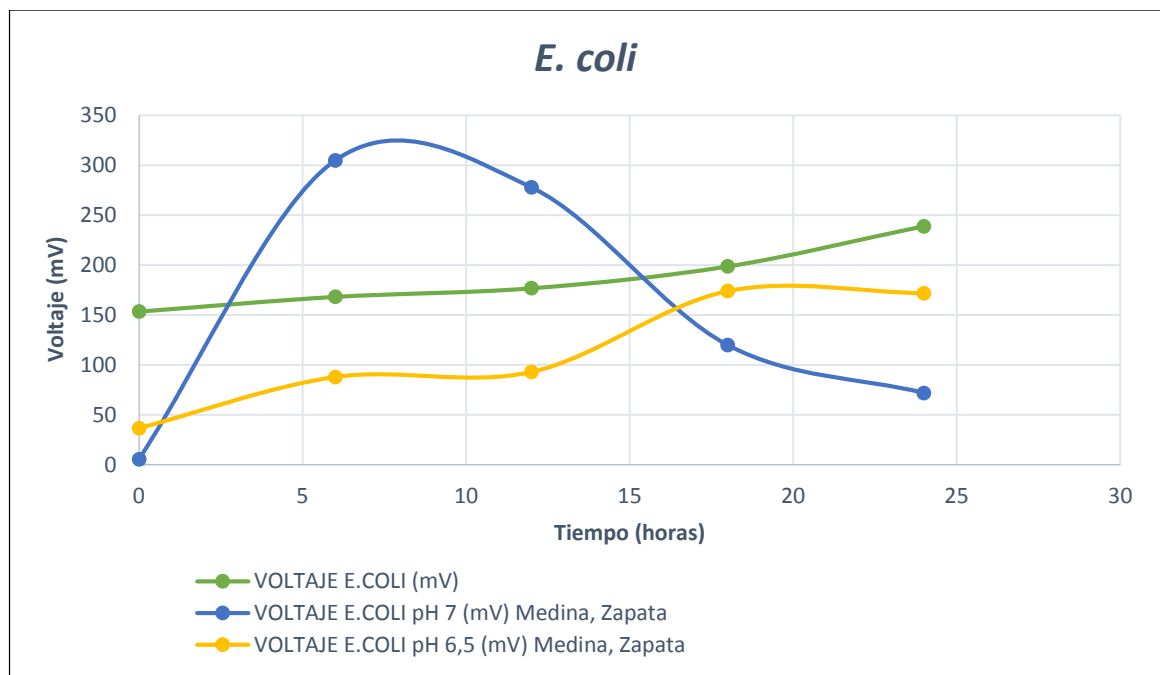
$$P * = \frac{P}{a}$$

$$P * = \frac{0,00001628 W}{0,0078 m^2} = 0,002087 \frac{W}{m^2}$$

3.3.2 Análisis de resultados de la producción de energía eléctrica. Una vez finalizadas las corridas experimentales implementando la celda de combustible microbiana se lleva a cabo la relación de la generación de energía mediante valores

de voltaje (V) para la celda de combustible microbiana estudiada por los autores Medina y Zapata y la celda de combustible microbiana implementada, utilizando condiciones similares de operación que incluyen un volumen de sustrato, Trypticasa de soya, de 800 ml, con placas de grafito como material de electrodo tanto para el ánodo como para el cátodo con un área superficial de 78 cm², un puente salino de agar-agar y cloruro de potasio (KCl) a 1M, que permite el paso de protones desde la cámara anódica hacia la catódica. En el gráfico 6, se evidencia el comportamiento de la *Escherichia coli* en la generación de energía eléctrica para los dos casos de estudio.

Gráfico 6. Generación de energía eléctrica para la *Escherichia coli* en los dos casos estudiado.

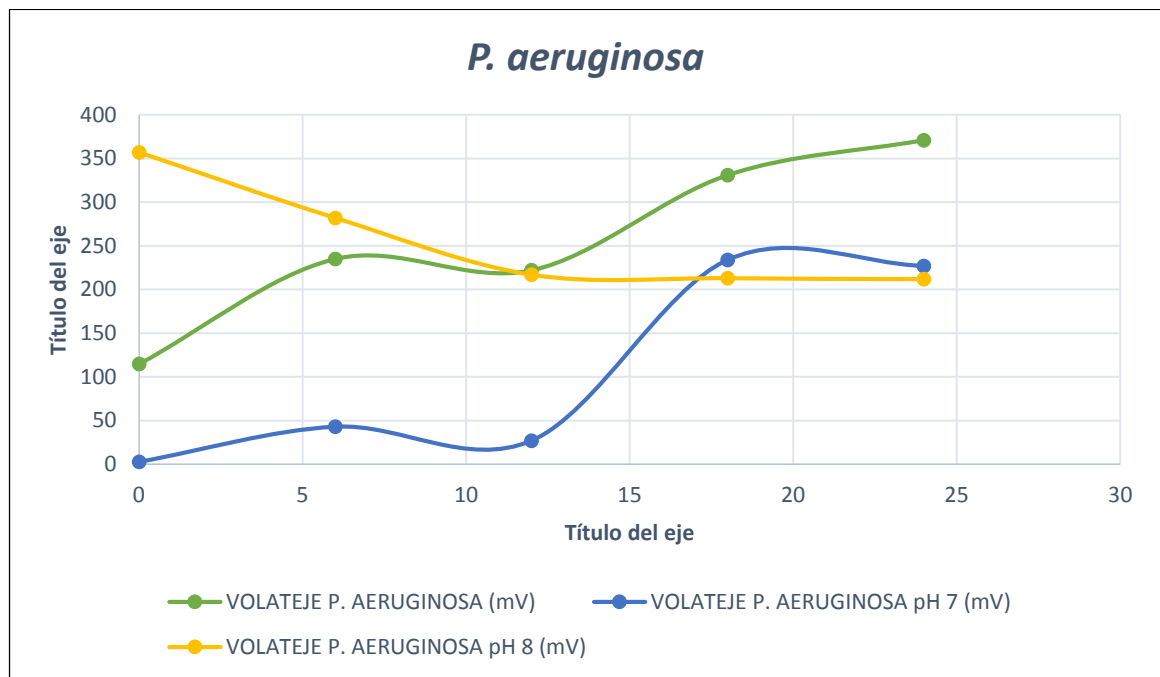


De acuerdo al gráfico 6, se observa que el comportamiento de la cepa estudiada es más estable en comparación con los datos reportados por Medina y Zapata, concluyendo que la configuración, materiales y dimensiones son parámetros influyentes al momento de evaluar la producción de energía en la CCM, por lo tanto el estudio adecuado de las criterios de selección se relaciona con la eficiencia de la celda. Teniendo en cuenta que se busca mantener condiciones de operación similares para llevar a cabo una comparación de datos efectiva, en el caso de la variable de pH la condición que más se asemeja a la estudiada es el comportamiento representado por voltaje *E. coli* pH 6,5 (mV), Medina y Zapata, determinando que para valores de pH cercanos a 6,3 – 6,5 la generación de energía eléctrica es mayor en la celda implementada. Por otro lado se considera que el rango de tiempo en el que se estudia la generación del voltaje no es apropiado para concluir la fase de muerte de la bacteria y su relación con la generación de energía,

cabe resaltar que en el gráfico se estudia un rango de tiempo de 24 horas a pesar que las pruebas realizadas en el trabajo de investigación abarca un tiempo de 30 horas.

En el gráfico 7, se evidencia el comportamiento de las *Pseudomonas aeruginosa* en la generación de energía eléctrica para los dos casos de estudio.

Gráfico 7. Generación de energía eléctrica para las *Pseudomonas aeruginosa* en los dos casos estudiado.



En el gráfico 7, se observa que en las primeras horas de operación de la celda el comportamiento para un valor de pH igual a 8 es favorable, sin embargo, con el tiempo este valor no tiene estabilidad y tiende a disminuir rápidamente, hecho que se ve reflejado por las condiciones alcalinas en las que trabaja la celda, considerando que para el óptimo crecimiento de la *P. aeruginosa* debe trabajar con valores cercanos a la neutralidad pH 7, se compararon los resultados con base en el pH mencionado. Al igual que en el caso de la *E. coli* se evidencia mayor generación de voltaje con el paso del tiempo en la CCM implementada en comparación con lo estudiado por Medina y Zapata, resultado que se obtiene de acuerdo a las consideraciones previamente enunciadas.

3.3.3 Análisis de DQO. El análisis DQO es un parámetro que permiten evaluar la calidad del agua, como se ha mencionado anteriormente, las aguas residuales poseen un alto contenido de carga orgánica, las CCM son una tecnología que permiten generar energía eléctrica y al mismo tiempo reducir el porcentaje de materia orgánica en las agua residuales, proceso que se realiza por la acción de microorganismos.

Se realizaron las pruebas de DQO para las muestras de agua resultantes después de culminado el proceso, se analizó una muestra en blanco, que corresponde al sustrato usado, en este caso agua residual sintética ,Tripticasa de soya, con el fin de identificar la demanda química de oxígeno inicial del medio; Por otra parte se realizaron pruebas para una muestra resultante del agua de la cámara anódica de las cepas *Escherichia coli*, sin mediador con un pH promedio de 6,3 y una muestra resultante del agua de la cámara anódica de las cepas *Pseudomonas aeruginosa*, sin mediador con un pH promedio de 6,4 La tabla 13 expone los resultados obtenidos de las pruebas realizadas que a su vez se encuentran en el Anexo E.

Tabla 13. Análisis DQO para las tres muestras del proceso.

Prueba	Muestra	DQO (mg/L O ₂)
1	Blanco (Tripticasa de soya)	23520
2	<i>Escherichia coli</i> , sin mediador, pH	21960
3	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , sin mediador, pH	20640

Obtenidos los resultados de las pruebas de DQO, tabla 13, se realiza el análisis de la cantidad de materia orgánica que se redujo, por medio de la determinación del porcentaje de reducción para las dos cepas seleccionadas durante el tiempo de operación en la CCM, el cual fue 30 horas. La tabla 14 muestra los porcentajes de reducción para ambos casos.

Tabla 14. Reducción de la materia orgánica presente en agua residual sintética

Prueba	Muestra	Reducción (mg/L O ₂)	% Reducción	Tiempo, Días (horas)
1	<i>E. coli</i> , sin mediador	1560	6,63	1,25 (30)
2	<i>P. aeruginosa</i> , sin mediador	2880	12,24	1,25 (30)

Con el fin de establecer la eficiencia de las cepas seleccionadas en la reducción de materia orgánica y la eficiencia de la CCM implementada, se realizó una búsqueda en referentes bibliográficos acerca del porcentaje de reducción en este tipo de tecnología, en la tabla 15 se muestra las investigaciones realizadas.

Tabla 15. Resultados de investigaciones realizadas en CCM y % de reducción del DQO

Configuración	Sustrato empleado	% Reducción DQO	Tiempo (horas)	Referencia
Dos cámaras tipo H	Agua residual del mercado de pescado	74 %	360	185
Dos cámaras*	Agua residual sintética de extracto de papa	61%	55	186
Dos cámaras	Agua residual alcalina	90 ± 4%	720	187
Una cámara	Agua residual	89,1%	1824	188

* *Escherichia coli*, como microorganismo activo en una CCM sin mediador

De acuerdo a los resultados de la tabla 15 se observó que las *Pseudomonas aeruginosa* tienen un mejor rendimiento en la reducción de materia orgánica presente en el agua residual seleccionada, Tripticasa de soya, logrando reducir 2880 mg/L O₂ y obteniendo un porcentaje de reducción de 12,24%, por otro lado, la cepa *Escherichia coli* presento un menor rendimiento, reduciendo 1560 mg/L O₂ de materia orgánica con un porcentaje de reducción de 6,63%.

Con el fin de comparar la capacidad de las cepas seleccionadas en la remoción de materia orgánica, en la tabla 15 se describieron algunas de las investigaciones realizadas en las CCM y porcentaje de reducción del DQO, cabe resaltar que para realizar la comparación se realizó una búsqueda de referentes bibliográficas con condiciones similares de operación a las de la CCM implementada. Comparando los resultados obtenidos en la tabla 14 y en la tabla 15, es evidente que el porcentaje de reducción de DQO es más bajo en las cepas seleccionados en comparación con los datos reportados en la bibliografía, en primer lugar se debe a que en la bibliografía consultada el tiempo de operación es más largo, por otra parte los materiales usados en estos estudios también puede influir en la remoción de materia orgánica, materiales tales como electrodos modificados o membranas de intercambio como Nafion. A pesar que el porcentaje de reducción no es alto se

¹⁸⁵ Chi-Yuan Lee; Jian-Hong Chen and Yuan-Yu Cai. Bioelectricity Generation and Organic Removal in Microbial Fuel Cells used for Treatment of Wastewater from Fish-Market. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING & MANAGEMENT. vol. 20, no. 3, p. 173-180

¹⁸⁶ HERRERO-HERNANDEZ, E.; SMITH, T. J. and AKID, R. Electricity generation from wastewaters with starch as carbon source using a mediatorless microbial fuel cell. [1]:2013. 194-198

¹⁸⁷ LIAO, Qiang, et al. Electricity generation and COD removal of microbial fuel cells (MFCs) operated with alkaline substrates. [1]:2014. 19349-19354

¹⁸⁸ WANG, Yun-Kun, et al. A novel electrochemical membrane bioreactor as a potential net energy producer for sustainable wastewater treatment. En: SCIENTIFIC REPORTS. vol. 3, p. 1864

comprueba que el uso de este tipo de tecnología responde de manera eficaz en procesos de tratamientos de agua.

4. CONCLUSIONES

- Las condiciones de operación de la celda de combustible microbiana están relacionadas con las condiciones de crecimiento de los microorganismos seleccionados, se determinó que variables como el pH, temperatura, potencial de óxido-reducción y composición del sustrato son de gran importancia por ser variables que influyen en el crecimiento del microorganismo y por ende en la producción de energía.
- De acuerdo con proyectos previos del grupo de investigación y considerando necesidades tales como, el control de las condiciones anaerobias en la cámara anódica, la composición del puente de intercambio iónico, los microorganismos empleados, el material de los electrodos y a su vez el estudio de los componentes de la CCM; se estableció que la configuración de celda de dos cámaras, tipo H es conveniente para la implementación a escala laboratorio.
- Para evaluar la eficiencia de la CCM se consideró estudiar los parámetros que influyen su operación, dimensiones y materiales, los cuales deben cumplir con diferentes criterios de selección. Alta conductividad térmica para las cámaras así como resistencia a altas temperaturas, un material de electrodos que permita la transferencia de electrones a través de él, es decir, que presente baja resistividad eléctrica, un material que permita el paso de los iones a través de él generando el transporte de protones de una cámara a otra, garantizando el buen funcionamiento de la CCM. Se seleccionó vidrio como material de las cámaras, electrodos de carbón grafito y un puente salino en lugar de una membrana de intercambio de iones.
- La temperatura, pH y voltaje, son las principales variables que permiten monitorear el buen funcionamiento de la celda de combustible microbiana, razón por la cual se empleó un *Software* de instrumentación virtual (Labview), para monitorear la temperatura y establecer la relación de ésta con el crecimiento óptimo del microorganismo. Se determinó la influencia de la variable temperatura en la generación de energía eléctrica de la CCM, por medio de los datos obtenidos con el *Software* implementado.
- Para comprobar que la CCM implementada funciona correctamente, se realizaron pruebas con dos cepas *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, a las mismas condiciones de un proyecto previo del grupo de investigación obteniendo un mejor desempeño y estabilidad en la generación de energía eléctrica con un voltaje promedio de 294,17 mV para las *Pseudomonas aeruginosa* para la CCM implementada en comparación con la celda de combustible microbiana utilizada previamente con un voltaje promedio de 113 mV para las *Pseudomonas aeruginosa*. En el caso de las *Escherichia coli* que produjo un voltaje promedio de 186,44 mV en la CCM implementada, en comparación con los estudios

previamente realizados los cuales obtuvieron un voltaje promedio de 112 mV. Los resultados obtenidos y la estabilidad en los datos demuestran que la selección de materiales, medidas y componentes de la CCM, influyeron de forma positiva en la generación de energía y reducción de carga orgánica del agua residual.

- Los análisis de los parámetros de calidad del agua, permitieron corroborar la reducción de DQO en el agua residual sintética empleada, del análisis realizado se obtuvo un valor inicial de DQO de 23520 mg/LO₂, logrando obtener una reducción de DQO para las *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli* de 12,24% y 6,63% respectivamente una vez finalizadas las pruebas, en comparación con estudios previos los cuales obtuvieron una reducción de DQO de 3,27% para las *Pseudomonas aeruginosa* y de 11,53% para las *Escherichia coli*, cabe resaltar que los análisis DQO se realizaron para cepas sin mediador, favoreciendo en el presente trabajo de investigación a las *Pseudomonas aeruginosa* para degradar los nutrientes que se encuentran en el sustrato al ser bacterias electrogénicas, por otro lado, se comprueba que la tecnología de las celdas de combustible microbiana son una alternativa adicional para el tratamiento de agua residual.

5. RECOMENDACIONES

Con el fin de dar continuidad a la investigación en este tipo de tecnología como una fuente de energía sustentable se recomienda realizar estudios en los siguientes aspectos:

- Realizar pruebas experimentales haciendo uso de diferentes tipos de microorganismos, evaluando la capacidad de producción de energía y reducción de carga orgánica del sustrato empleado.
- Proponer el uso de mediadores, naturales o sintéticos, durante la operación de la CCM con el objetivo de evaluar el efecto de estas sustancias en la producción de energía.
- Llevar a cabo pruebas experimentales con agua residual doméstica o industrial, manteniendo las condiciones de operación constantes, determinando la producción de energía eléctrica y reducción de DQO en un proceso con agua residual no caracterizada.
- Evaluar la producción de energía y reducción de DQO en un tiempo de operación más prolongado al estudiado en el presente trabajo de investigación.
- Estudiar el efecto de los diferentes materiales de electrodos en la producción de energía eléctrica, realizando pruebas experimentales con electrodos combinados, electrodos de carbón modificados o electrodos metálicos y determinar si influyen en la generación de energía.
- Utilizar diferentes medidas de área y volumen de electrodos, estudiar el efecto de estas medidas en la capacidad de producción de energía con el fin de lograr establecer una relación entre área y volumen de electrodos con producción de energía eléctrica.
- Estudiar el efecto de una posible agitación en la celda de combustible microbiana, con el fin de mantener homogeneizado el proceso, evitando que los nutrientes presentes en el sustrato se ubiquen en el fondo de la cámara anódica afectando la eficiencia de la CCM.
- Proponer el uso de diferentes concentraciones de electrolito en el puente de intercambio iónico o estudiar la eficiencia de la celda de combustible microbiana al hacer uso de otro tipo de membrana de intercambio.

BIBLIOGRAFIA

ADJEMIAN, K. T., *et al.* Silicon Oxide Nafion Composite Membranes for Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Operation at 80-140°C. 2002.

ALDROVANDI, Aba, *et al.* Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell. [1]:2009. 3252-3260

ALSHEHRIA, Abdullah N. Z.; GHANEM, Khaled M. and AL-GARNI, Saleh M. Application of a five level central composite design to optimize operating conditions for electricity generation in a microbial fuel cell. [1]:2016. 797-804

AMSLER, Maximilian, *et al.* Prediction of a novel monoclinic carbon allotrope. En: EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B -- CONDENSED MATTER. vol. 86, no. 9, p. 1-3

ASENSIO, Y., *et al.* Selection of cheap electrodes for two-compartment microbial fuel cells. [1]:2017. 235-240

BUITRÓN, Germán and PÉREZ, Jaime. Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. En: TIP. REVISTA ESPECIALIZADA EN CIENCIAS QUÍMICO-BIOLÓGICAS. vol. 14, no. 1, p. 5

CANO, Ulises. Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. [0]: México: 1999. 208-214

CASTELLAN, G. W. and BASÍN, M. E. C. Físicoquímica. Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.

CEDRÓN, Juan Carlos, LANDA, Victoria and ROBLES, Juana. Química General. Material de enseñanza. [0]. [Consultado el 12 de Noviembre 2017]. Disponible en: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/42-celdas-galvanicas-o-celdas-voltaicas.html>

CHENG, Shaoan; LIU, Hong and LOGAN, Bruce. Increased Power Generation in a Continuous Flow MFC with Advective Flow through the Porous Anode and Reduced Electrode Spacing. 2006. 2426-32 p.

Chi-Yuan Lee; Jian-Hong Chen and Yuan-Yu Cai. Bioelectricity Generation and Organic Removal in Microbial Fuel Cells used for Treatment of Wastewater from Fish-Market. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING & MANAGEMENT. vol. 20, no. 3, p. 173-180

Condorchem Envitech. Generación de energía a partir de aguas residuales urbanas: Proyecto LIFE SAVING-E. [0]. Marzo 31. [Consultado el Enero 30, 2018]. Disponible en: <https://blog.condorchem.com/category/produccion-de-energia/>

CORREA-DUARTE, Miguel A., et al. Fabrication and biocompatibility of carbon nanotube-based 3D networks as scaffolds for cell seeding and growth. En: NANO LETTERS. vol. 4, no. 11, p. 2233-2236

CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación industrial (7a. ed.). Barcelona: Marcombo, 2005.

DE PAULA, J. Química Física. Médica Panamericana, 2007. 947 p. ISBN 9789500612487

DESMARAIS, Ron and BREUER, Jim. How to Select and Use the Right Temperature Sensor. En: SENSORS MAGAZINE. Jan 1, .vol. 18, no. 1, p. 24

DEWAN, Alim; BEYENAL, Haluk and LEWANDOWSKI, Zbigniew. Scaling up Microbial Fuel Cells. En: ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY. vol. 42, no. 20, p. 7643-7648

DU, Z.; LI, H. and GU, T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. En: BIOTECHNOLOGY ADVANCES. vol. 25, no. 5, p. 464-482

DUMITRU, A. and SCOTT, K. 4 - Anode Materials for Microbial Fuel Cells. En: SCOTT, Keith and YU, Eileen Hao eds. Microbial Electrochemical and Fuel Cells. Boston: Woodhead Publishing, 2016. 117-152 p.

ERABLE, B., *et al.* Single medium microbial fuel cell: Stainless steel and graphite electrode materials select bacterial communities resulting in opposite electrocatalytic activities. [1]:2017. 26059-26067

ESTEVE-NEZ, Abraham. Bacterias productoras de electricidad.

FALCN, A.; LOZANO, J. E. and JUREZ, K. Bioelectricidad. En: BioTecnologa. vol. 13, no. 3, p. 62-78

Fei Yu; Chengxian Wang and Jie Ma. Applications of Graphene-Modified Electrodes in Microbial Fuel Cells. [0]:Basel: MDPI AG, 2016. 807 ISBN 1996-1944.

FISHERIES AND AQUACULTURE MANAGEMENT DIVISION FISHERIES AND AQUACULTURE MANAGEMENT DIVISION. Training manual on Gracilaria culture and seaweed processing in China. [0]:China: job number: AB730, 1990. 107

FLETCHER, M. Attachment of Pseudomonas fluorescens to glass and influence of electrolytes on bacterium-substratum separation distance. 1988. 2027-30 p.

FOWLER, R. J. Electricidad: principios y aplicaciones. Reverté, 1986.

Fundación vasca para la seguridad agro alimentaria. Escherichia coli. [0]. 28 de Febrero de. [Consultado el 16 de Noviembre de 2017]. Disponible en: http://www.elika.net/datos/pdfs_agrupados/Documento84/3.Ecoli.pdf

FUTAMATA,Hiroyuki, *et al.* Adaptation of soil microbes during establishment of microbial fuel cell consortium fed with lactate. [1]:2013. 58-63

GARCA BERNAL,Elena, *et al.* Tecnología de membranas en Pilas de combustible microbianas.

GARRIDO,Lucia. Simulación de la operación de una Microbial Fuel Cell para aplicación en sistemas aislados de la red Universidad de Sevilla, 2016. p. 3-108.

GHASEMI,Mostafa, *et al.* Performance Comparison of Three Common Proton Exchange Membranes for Sustainable Bioenergy Production in Microbial Fuel Cell. [1]:2015. 162-166

GIL,Geun-Cheol, *et al.* Operational parameters affecting the performannce of a mediator-less microbial fuel cell. [1]:2003. 327-334

GOOD FELLOW,5. 0. Catalogo en linea, Materiales. [0]. [Consultado el 22 de Noviembre de2017]. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Polimetacrilato-de-Metilo.html>

GUDE,Veera Gnaneswar. Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview. [1]:2016. 287-307

HA,Phuc Thi; TAE,Beomseok andCHANG,In Seop. Performance and Bacterial Consortium of Microbial Fuel Cell Fed with Formate. En: ENERGY & FUELS. Jan.vol. 22, no. 1, p. 164-168

HARNISCH,F.; SCHRODER,U. andSCHOLZ,F. The suitability of monopolar and bipolar ion exchange membranes as separators for biological fuel cells. En: ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY. Mar 1.vol. 42, no. 5, p. 1740-1746

HAYNES,W. M. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 93rd Edition. Taylor & Francis, 2012.

HE,Li, *et al.* Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. En: RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. Dec.

HEILMANN,Jenna andLOGAN,Bruce E. Production of Electricity from Proteins Using a Microbial Fuel Cell. En: WATER ENVIRONMENT RESEARCH. May.vol. 78, no. 5, p. 531-537

HEITNER-WIRGUIN,Carla. Recent advances in perfluorinated ionomer membranes: Structure, properties and applications. 1996. 1-33 p.

HELMENSTINE,Anne Marie. Table of electrical resistivity and conductivity. [0]. Jul, 19. [Consultado el 22 de Noviembre de2017]. Disponible en: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>

HEPLER,L. G. Principios de química. Reverté, 1968.

HERNÁNDEZ-FLORES,G.; POGGI-VARALDO,H. M. and SOLORZA-FERIA,O. Comparison of alternative membranes to replace high cost Nafion ones in microbial fuel cells. [1]:2016. 23354-23362

HOU,Junxian, et al. A comparative study of graphene-coated stainless steel fiber felt and carbon cloth as anodes in MFCs. En: BIOPROCESS & BIOSYSTEMS ENGINEERING. vol. 38, no. 5, p. 881-888

HUSSEIN,I.; MANSOUR,A. and BAHGAT,M. Metal electrodes and organic enrichment in doubled and single chambered Microbial Fuel Cell (MFC) for electricity generation. En: JOURNAL OF BIOCHEMICAL TECHNOLOGY. vol. 4, no. 1, p. 554-560

IEROPOULOS,Ioannis A., *et al.* Comparative study of three types of microbial fuel cell. [1]:2005. 238-245

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 33p. c.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 36p. 2008.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 23p.

JAYAPRIYA,J., *et al.* Preparation and characterization of biocompatible carbon electrodes. [1]:2012. 1329-1335

Keysight Technologies; How to Select the Correct and Temperature Sensor. Keysight Technologies How to Select the Correct Temperature Sensor. [1]:

LI,Shuang; CHENG,Chong and THOMAS,Arne. Carbon-Based Microbial-Fuel-Cell Electrodes: From Conductive Supports to Active Catalysts. 2016. 1602547 p.

LI,Wen-Wei, et al. Recent advances in the separators for microbial fuel cells. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 102, no. 1, p. 244-252

LIANG,Peng, et al. Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 77, no. 3, p. 551-558

LIAO,Qiang, *et al.* Electricity generation and COD removal of microbial fuel cells (MFCs) operated with alkaline substrates. [1]:2014. 19349-19354

LOGAN,Bruce E. Microbial fuel cells. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.

LOPEZ,Juan. Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales. Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica (CIDETEQ), 2014. p. 8-10.

LOPEZ,Oscar. Celdas Electroquímicas. [0]. Abr 7,. [Consultado el 12/11/2017]. Disponible en: <https://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>

LUO,Yong, *et al.* Power generation from furfural using the microbial fuel cell. [1]:2010. 190-194

MACANÁS DE BENITO,Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006. p. 259.

MADIGAN,M. T., *et al.* Brock biología de los microorganismos. Pearson Educación, 2004.

MÄKINEN,Annukka E., *et al.* Bioelectricity production on xylose with a compost enrichment culture. [1]:2013. 15606-15612

MAYA,C. A. C. Fenómenos químicos. Fondo Editorial Universidad Eafit, 2002.

MERCK MILLIPORE. MERCK MILLIPORE, Tryptic Soy Broth (TSB), Casein-Peptone Soymeal-Peptone (CASO) Broth [0]. [Consultado el 20 de noviembre2017]. Disponible en: disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Tryptic-SoyBroth,MDA_CHEM105459?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com.co%2F#anchor_orderingcomp

AnonymousMinambiente y WWF, unidos por la energía renovable. [0]. Mayo 25,. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/129-noticias-negocios-verdes/2313-minambiente-y-wwf-unidos-por-la-energia-renovable>

Ministerio de educacion Nacional Centro virtual de noticias. Colombia una potencia en energías alternativas. [0]. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>

Mustakeem. Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. En: MATERIALS FOR RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY. vol. 4, no. 4, p. 22

NANDY,Arpita; KUMAR,Vikash andKUNDU,Patit P. Effect of electric impulse for improved energy generation in mediatorless dual chamber microbial fuel cell through electroevolution of Escherichia coli. [1]:2016. 796-801

National Instruments. LabView. [0]. [Consultado el 16 de Noviembre de2017]. Disponible en: <http://www.ni.com/es-co.html>

NAZAR,Julio. Biofilms bacterianos. En: REVISTA DE OTORRINOLARINGOLOGA Y CIRUGA DE CABEZA Y CUELLO. vol. 67, no. 1, p. 161-172

OH,Sang-Eun andLOGAN,Bruce E. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 70, no. 2, p. 162-169

PANDIT,Soumya, et al. Performance of electron acceptors in catholyte of a two-chambered microbial fuel cell using anion exchange membrane. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. vol. 102, no. 3, p. 2736-2744

PARKASH,Anand. Design and Fabrication of a Double Chamber Microbial Fuel Cell for Voltage Generation from Biowaste. 2015.

PASSOS,Vinicius Fabiano, et al. Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater treatment plant. En: SCIENTIA AGRICOLA. Oct.vol. 73, no. 5, p. 424-428

PATIL,Sunil A., *et al.* Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. [1]:2009. 5132-5139

Perma Pure L.L.C. a Halma Company. All about Nafion. [0]. [Consultado el 20 de Noviembre de2017]. Disponible en: <http://www.permapure.com/resources/all-about-nafion-and-faq/>

PINEDA MARIN, Ana del Pilar andROSAS TAFUR,Martha Lizeth. Estado del Arte en Celdas de Combustible Microbianas (CCM) para la Producción de Bioenergía. Universidad Distrital, 2016.

Portal XM boletín de movimientos. PRONÓSTICO DE DEMANDA. [0]. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <http://www.xm.com.co/Paginas/Consumo/pronostico-de-demanda.aspx>

PREZ ROMERO,Silvia Gabriela; VILCACHAGUA,Alania andMASIEL,Yorka. Efecto de la temperatura en el crecimiento de dos cepas ATCC de Pseudomonas sp. expuestas a polipropileno.

QIAO,Yan, *et al.* Real-time monitoring of phenazines excretion in Pseudomonas aeruginosa microbial fuel cell anode using cavity microelectrodes. [1]:2015. 1-6

RABAEY,Korneel andVERSTRAETE,Willy. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. [1]:2005. 291-298

RAHIMNEJAD,Mostafa, *et al.* Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. [1]:2015. 745-756

RIVAS,C. andMOTA,M. Bacterias anaerobias.

ROMO,Dolly; HURTADO GUTIERREZ,Nelson Humberto andRUIZ,Jaime,O. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. 2012. 17-28 p.

SAAVEDRA SALAS,Igor Marcos. Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro. CyberDocs,

SALAZAR,Maria del Socorro. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE BIOCELDAS. [0]:México: 1-81

SANTORO,Carlo, *et al.* Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. [1]:2017. 225-244

SCOTT,K. 1 - an Introduction to Microbial Fuel Cells. En: SCOTT,Keith andYU,Eileen Hao eds. Microbial Electrochemical and Fuel Cells. Boston: Woodhead Publishing, 2016. 3-27 p.

SEARS,F. W.; FORD,A. L. andFREEDMAN,R. A. Física universitaria. Pearson Educación, 2005.

SEVDA,Surajbhan andSREEKRISHNAN,T. R. Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND HEALTH, PART A. vol. 47, no. 6, p. 878-886

SHAHI,Amrita; RAI,B. N. andSINGH,R. S. A comparative study of a bio fuel cell with two different proton exchange membrane for the production of electricity from waste water. [1]:2017. 78-81

SILVA CASTILLO,Ren Oswaldo. No title. En: AISLAMIENTO E IDENTIFICACION DE PSEUDOMONAS SPP.Y PATRN DE RESISTENCIA A ANTIMICROBIANOS EN REPTILES EN CAUTIVERIO.

SONAWANE,Jayesh M., *et al.* Recent advances in the development and utilization of modern anode materials for high performance microbial fuel cells. [1]:2017. 558-576

SOTRES,Ana, *et al.* Microbial community dynamics in two-chambered microbial fuel cells: Effect of different ion exchange membranes. 2015. 1497-1506 p.

SUGNAUX,Marc, *et al.* Probing electron transfer with Escherichia coli: A method to examine exoelectronics in microbial fuel cell type systems. [1]:2013. 567-573

SUN,Guotao, *et al.* The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells. En: APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY. vol. 98, no. 6, p. 2415-2427

UNESCO andOrganizacion de las naciones unidas para la educacion, la ciencia y la cultura. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). [0]. [Consultado el Enero 30,2018]. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/about/>

VARGAS,O. D. Reacciones de oxido-reducción. Universidad Autónoma Metropolitana, Unida Xochimilco, 2001.

VIDRASA. Propiedades físicas y químicas Vidrio borosilicato [0]. Catalogo. [Consultado el 22 de Noviembre de2017]. Disponible en: http://www.vidrasa.com/esp/productos/duran/duran_pf.html

WALSH,F.; GARCÍA,J. G. andLEGUEY,V. M. Un primer curso de ingeniería electroquímica. Club Universitario, 1999.

WANG,Yun-Kun, et al. A novel electrochemical membrane bioreactor as a potential net energy producer for sustainable wastewater treatment. En: SCIENTIFIC REPORTS. vol. 3, p. 1864

WEI,Jincheng; LIANG,Peng andHUANG,Xia. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. [1]:2011. 9335-9344

Wei-Hsuan Hsu; Hung-Yin Tsai andYing-Chen Huang. Characteristics of Carbon Nanotubes/Graphene Coatings on Stainless Steel Meshes Used as Electrodes for Air-Cathode Microbial Fuel Cells. En: JOURNAL OF NANOMATERIALS. Jan 1, .vol. 2017,

XU,Juan, *et al.* Fouling of proton exchange membrane (PEM) deteriorates the performance of microbial fuel cell. [1]:2012. 1817-1824

ZHOU,Minghua, *et al.* An overview of electrode materials in microbial fuel cells. [1]:2011. 4427-4435

ZHOU,Minghua, *et al.* Bioelectrochemistry of Microbial Fuel Cells and their Potential Applications in Bioenergy. 2014. 131-152

ANEXOS

ANEXO A.
**MANUAL INSTRUCCIONES Y CONDICIONES DE USO PARA LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA
IMPLEMENTADA**



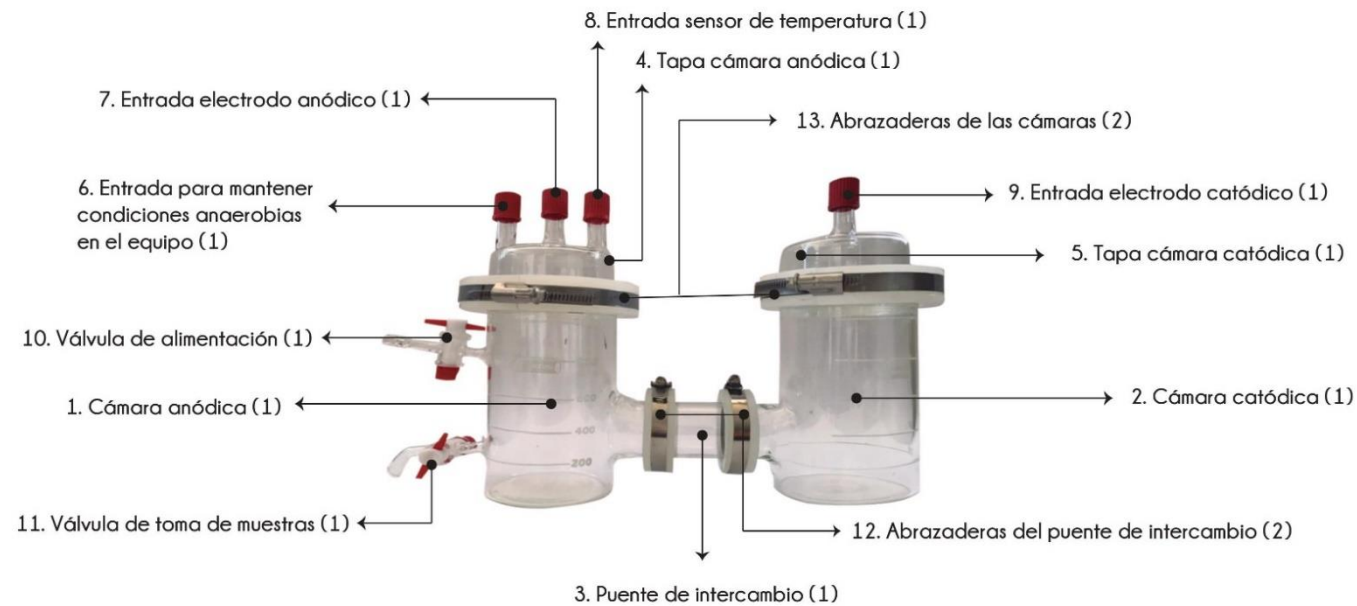
MANUAL DE INSTRUCCIONES CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA



Elaborado por: María Alejandra Bermúdez Montaña
Erika Dayana Bernal Aragón

1. IDENTIFICACIÓN DE LAS PIEZAS Y ACCESORIOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

Se identifican cada una de las piezas con sus respectivos accesorios que componen la celda de combustible microbiana.



Piezas de la celda de combustible microbiana

DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES

1. Cámara anódica: La cámara anódica es donde se realiza el proceso de oxidación de la materia orgánica del sustrato, y según las características del potencial de óxido - reducción se manejan condiciones anaerobias o aerobias.
2. Cámara catódica: Se lleva a cabo el proceso de reducción.
3. Puente de intercambio: Permite la transferencia de los iones y se pueden emplear diferentes tipos de materiales.
4. Tapa cámara anódica:
5. Tapa cámara catódica:
6. Entrada para mantener condiciones anaerobias en el equipo: Se hace uso de un sobre de anaerobiosis el cual se encuentra sostenido por una pinza, en caso de no utilizar la pinza se puede llevar a cabo bombeo de nitrógeno para mantener las condiciones anaerobias dentro de la cámara.
7. Entrada electrodo anódico: Se sujeta el electrodo anódico a utilizar mediante un cable conductor.
8. Entrada sensor(es):
9. Entrada electrodo catódico: Se sujeta el electrodo catódico a utilizar mediante un cable conductor.
10. Válvula de alimentación: Se emplea con el fin de operar la CCM en modo continuo.
11. Válvula de toma de muestras: Se emplea una válvula de toma de muestras para monitorear variables del proceso.
12. Abrazaderas del puente de intercambio: Aseguran la unión entre las cámaras y el puente.
13. Abrazaderas de las cámaras: Permiten sellar de manera efectiva cada una de las cámaras.

ACCESORIOS



1. Anillo de goma puente de intercambio (2)



2. Abrazadera puente de intercambio (2)



3. Abrazadera cámara (2)



4. Aseguradora puente de intercambio (2)



5. Aseguradora cámara (2)



6. Pinza sujetadora sobre de anaerobiosis.

Piezas de la celda de combustible microbiana

1. ENSAMBLE DE LA CELDA PASO POR PASO.

A. Unión del anillo de goma en el puente de intercambio.

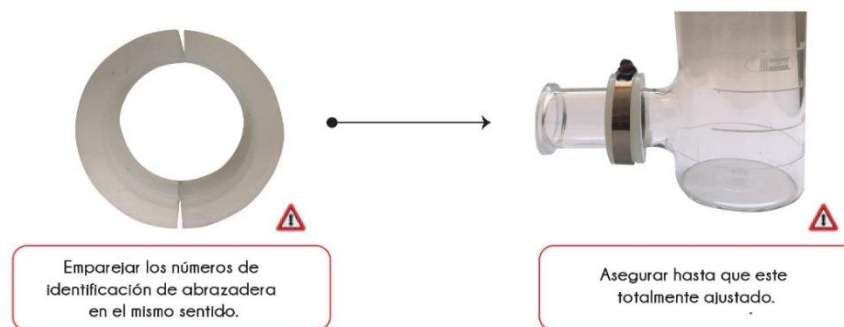


Unir el anillo de goma en cada una de las bases del puente de intercambio, para impedir cualquier tipo de fugas durante de la operación.

B. Acoplar del puente de intercambio a la cámara catódica, mediante el uso de abrazaderas.

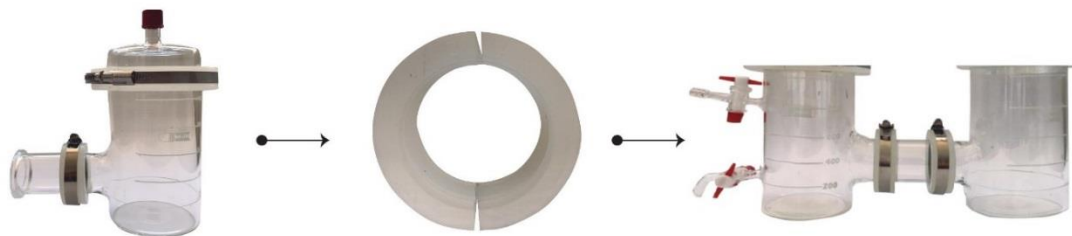


Llenado el puente de intercambio, se acomoda la aseguradora en el extremo izquierdo de la cámara catódica.

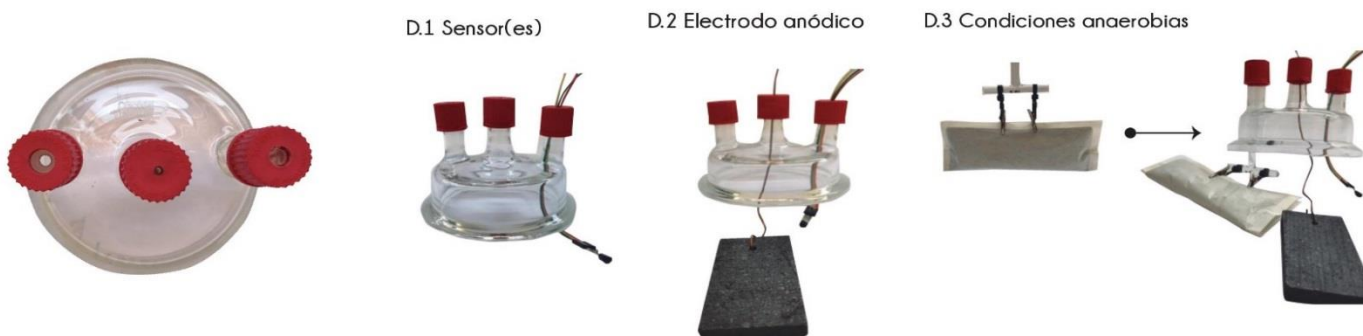


Rodear la unión puente de intercambio - cámara catódica con la abrazadera puente de intercambio (identificación de accesorios), con la aseguradora ajustar la unión.

C. Acoplar del puente de intercambio a la cámara anódica, mediante el uso de abrazaderas.



D. Adaptar entradas, tapa cámara anódica.



En la tabla identificación de piezas se establecen las entradas en la tapa de la cámara anódica..

E. Adaptar entradas tapas cámara catódica
Repetir el paso D.2 para el electrodo catódico



F. Cerrar cámara anódica

Sellar la cámara anódica con su respectiva tapa, una vez finalizado el proceso de llenado, repetir el paso B con los respectivos accesorios de las piezas.



G. Cerrar cámara catódica



3. CONDICIONES DE USO

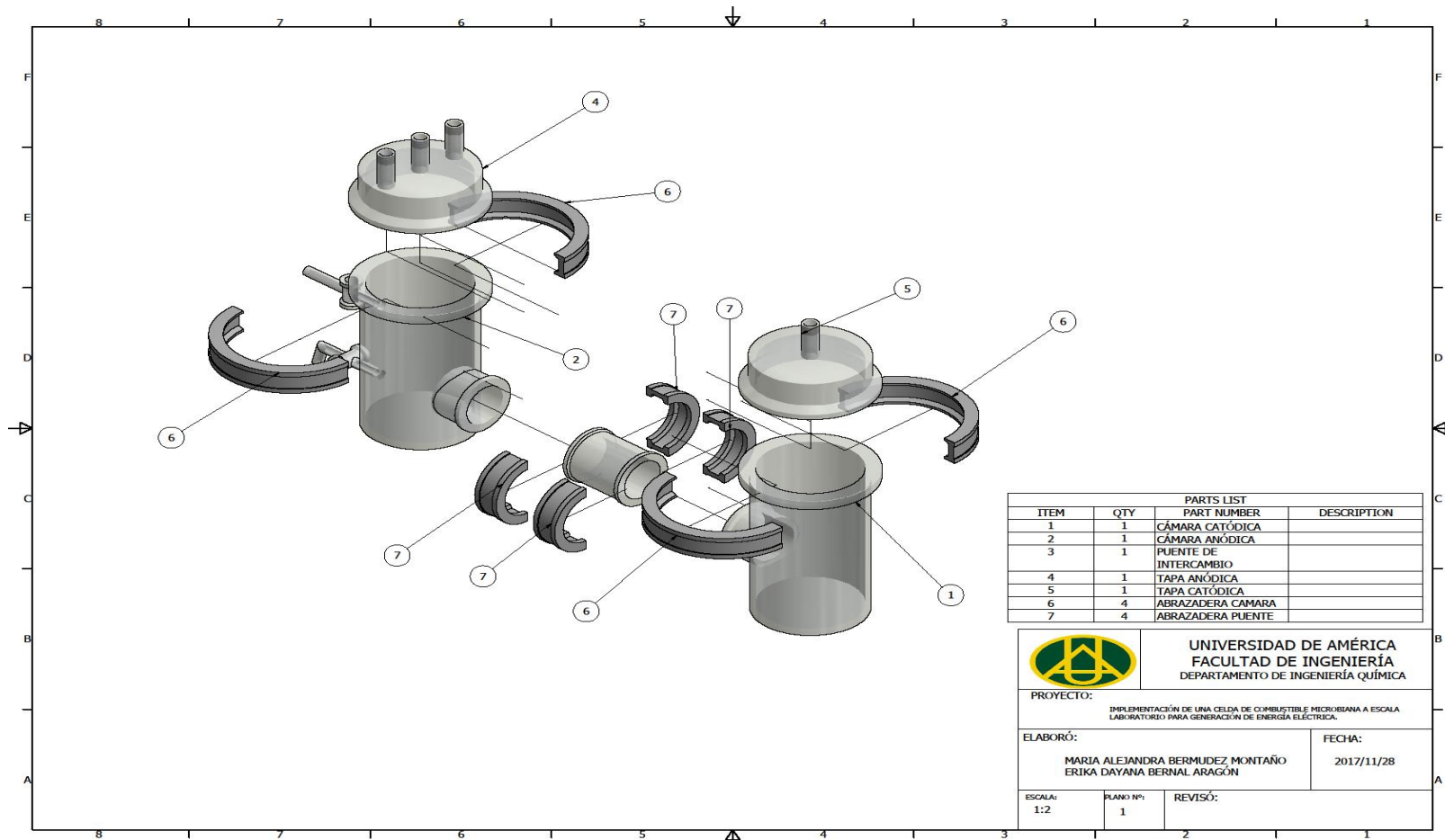
- La temperatura máxima de utilización es de 500°C
- De acuerdo al tipo de material empleado en el puente de intercambio se debe considerar la preparación previa al ensamblaje de la celda.
- La capacidad de sustrato a emplear no debe superar 800 ml.
- Verificar con anterioridad la posición de las válvulas 10 y 11 (Identificación de piezas) para evitar derrames durante el llenado de la cámara anódica.
- El llenado de las cámaras debe realizarse antes de sellar las cámaras.
- Agregar el microorganismo posterior al llenado de las cámaras y sellar de forma inmediata.
- Para el correcto funcionamiento de la celda de combustible microbiana es necesario agregar tanto el sustrato como el microorganismo únicamente en la cámara anódica.
- Para abrir las válvulas 10 y 11 asegúrese que la rosca ubicada en la parte inferior de cada una de las válvulas no se encuentre totalmente ajustada para no generar daños al material.

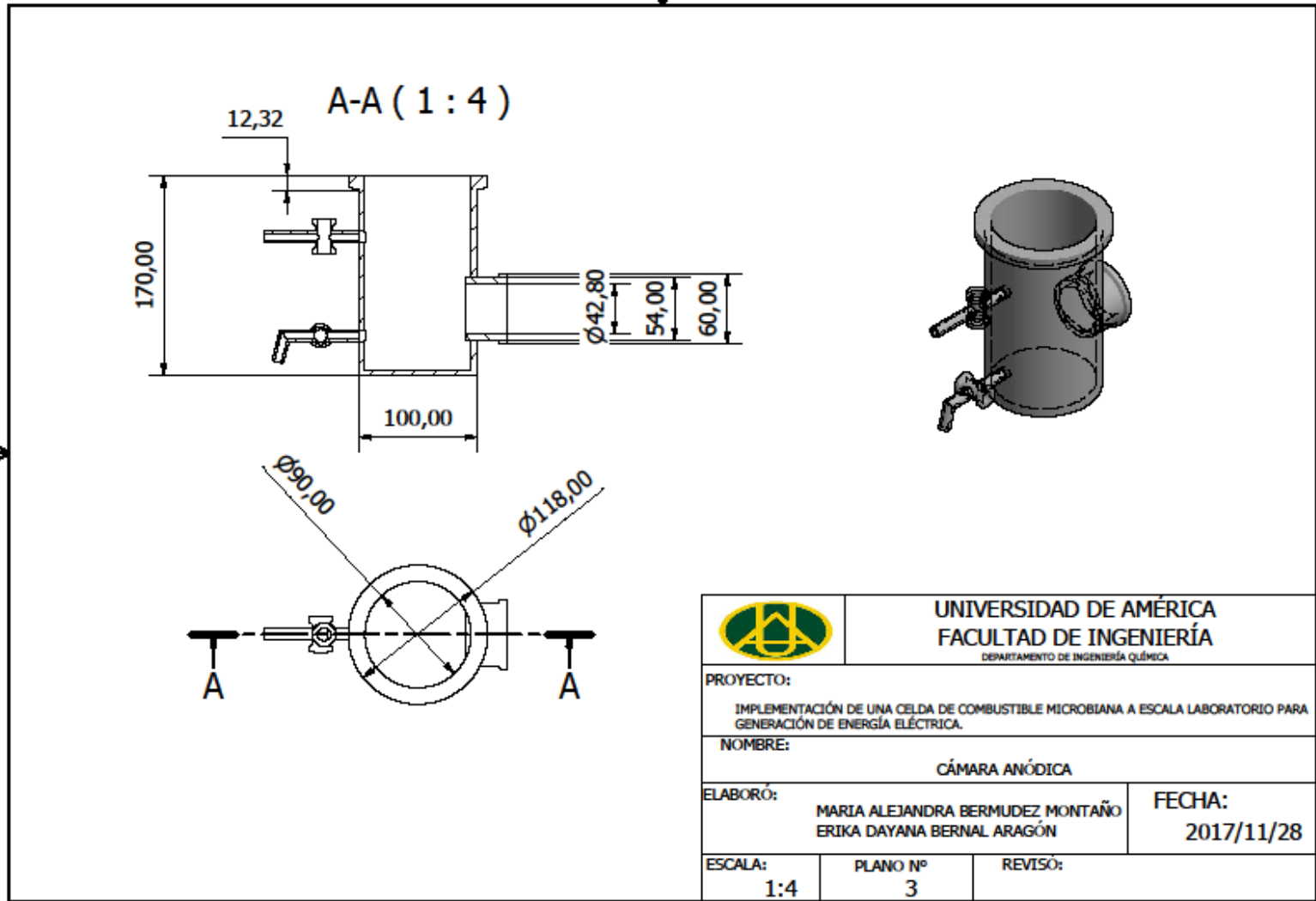


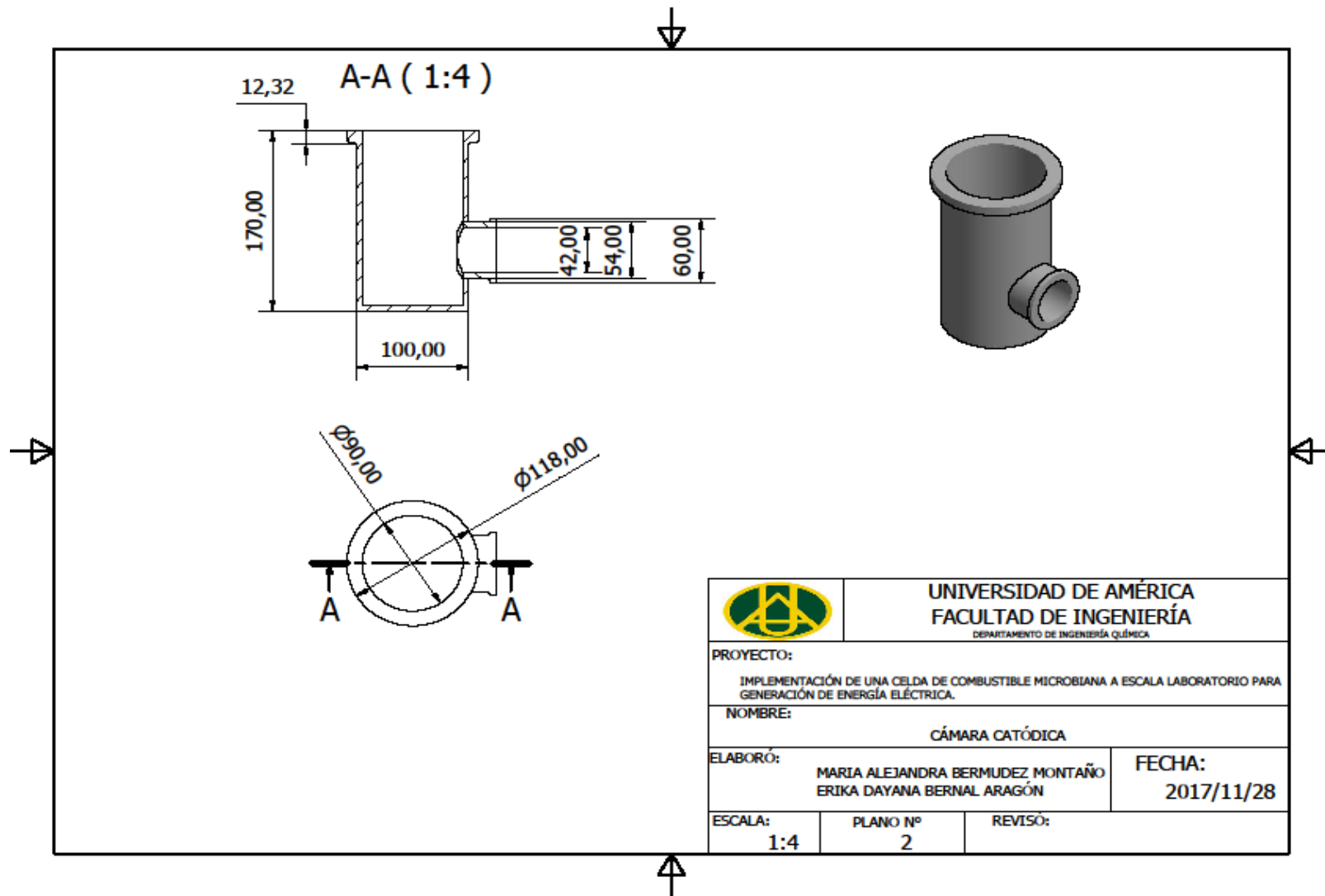
Ejemplo Celda de Combustible Microbiana ensamblada y en operación.

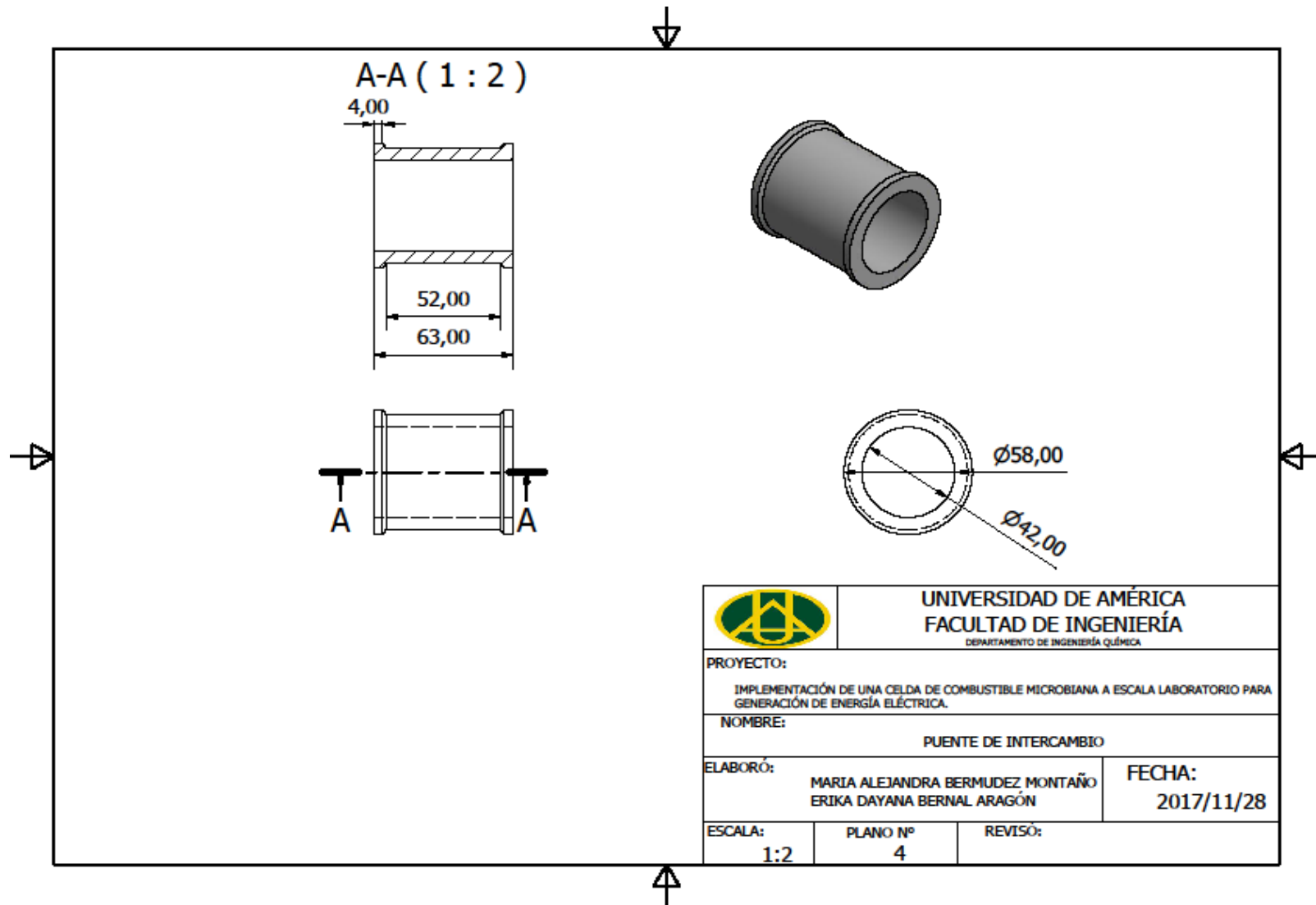
ANEXO B.

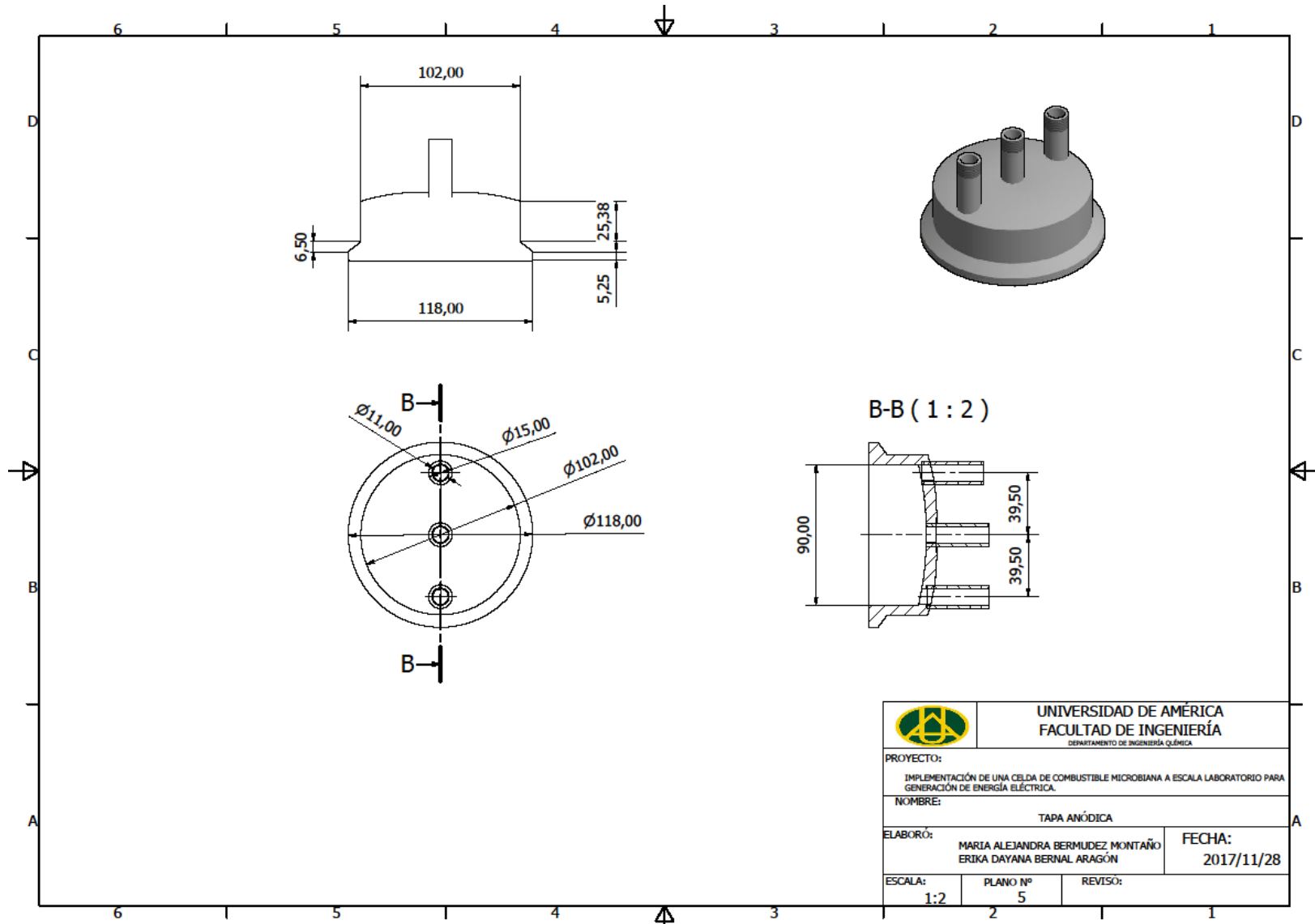
PLANO CCM LLEVADOS A CABO EN EL SOFTWARE CAD, AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2017 BAJO EL ESTÁNDAR DE LAS NORMAS ISO PARA EL DIBUJO TÉCNICO




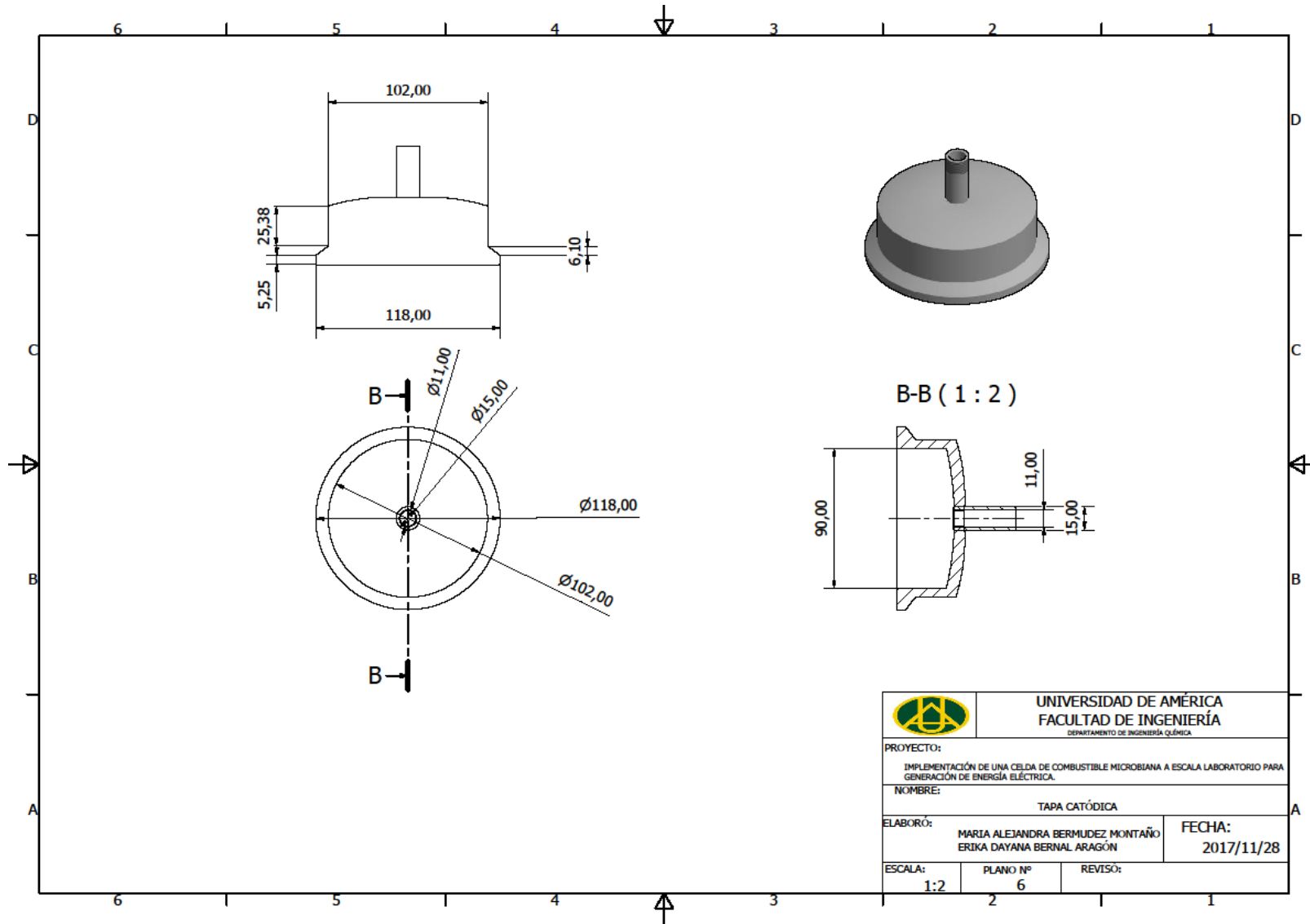


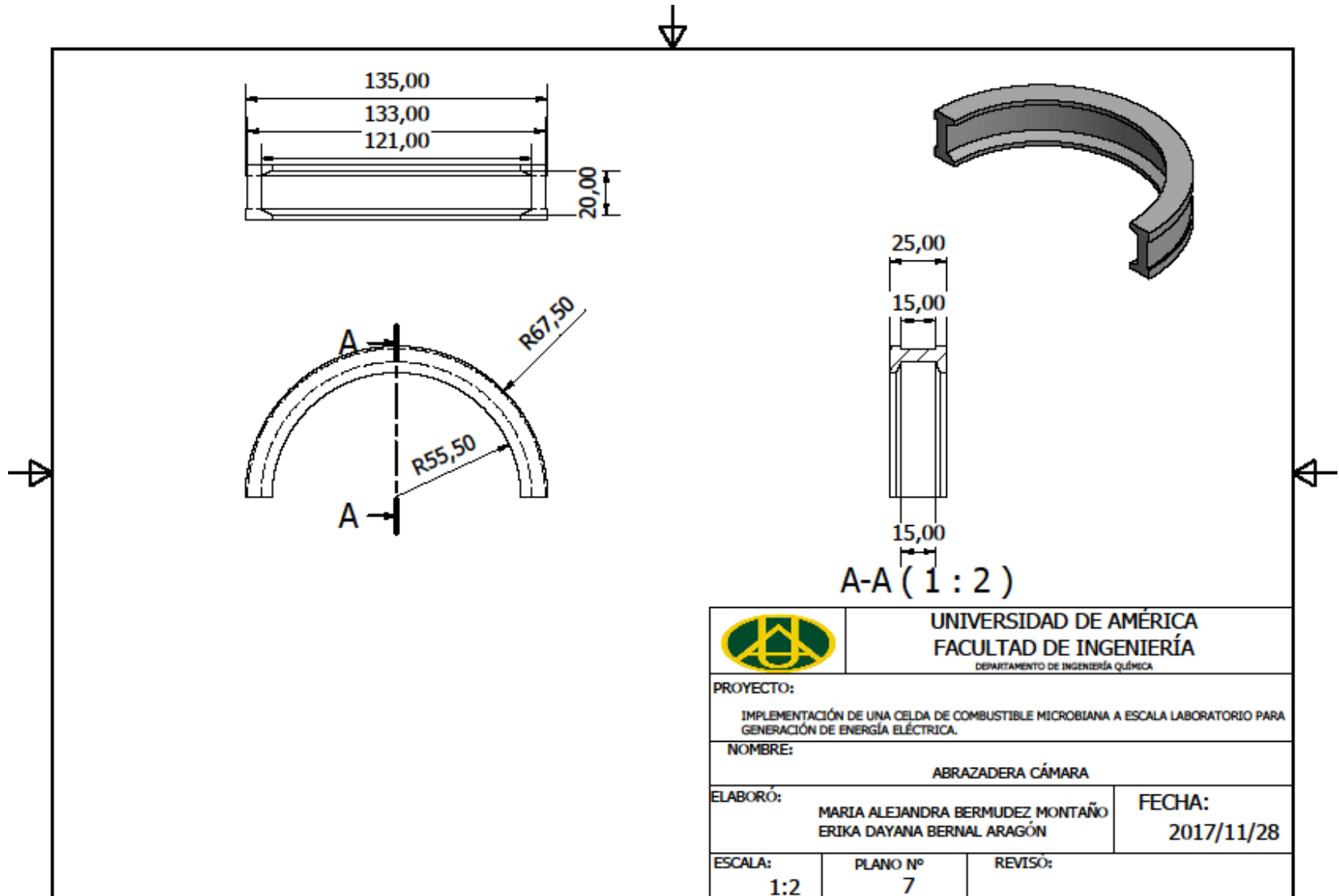






		UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍA <small>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA</small>	
		PROYECTO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA LABORATORIO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	
NOMBRE: TAPA ANÓDICA		FECHA: 2017/11/28	
ELABORÓ: MARIA ALEJANDRA BERMUDEZ MONTAÑO ERIKA DAYANA BERNAL ARAGÓN		REVISÓ:	
ESCALA: 1:2	PLANO Nº 5		





UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO:

IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA LABORATORIO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

NOMBRE:

ABRAZADERA CÁMARA

ELABORÓ:

MARIA ALEJANDRA BERMUDEZ MONTAÑO
ERIKA DAYANA BERNAL ARAGÓN

FECHA:

2017/11/28

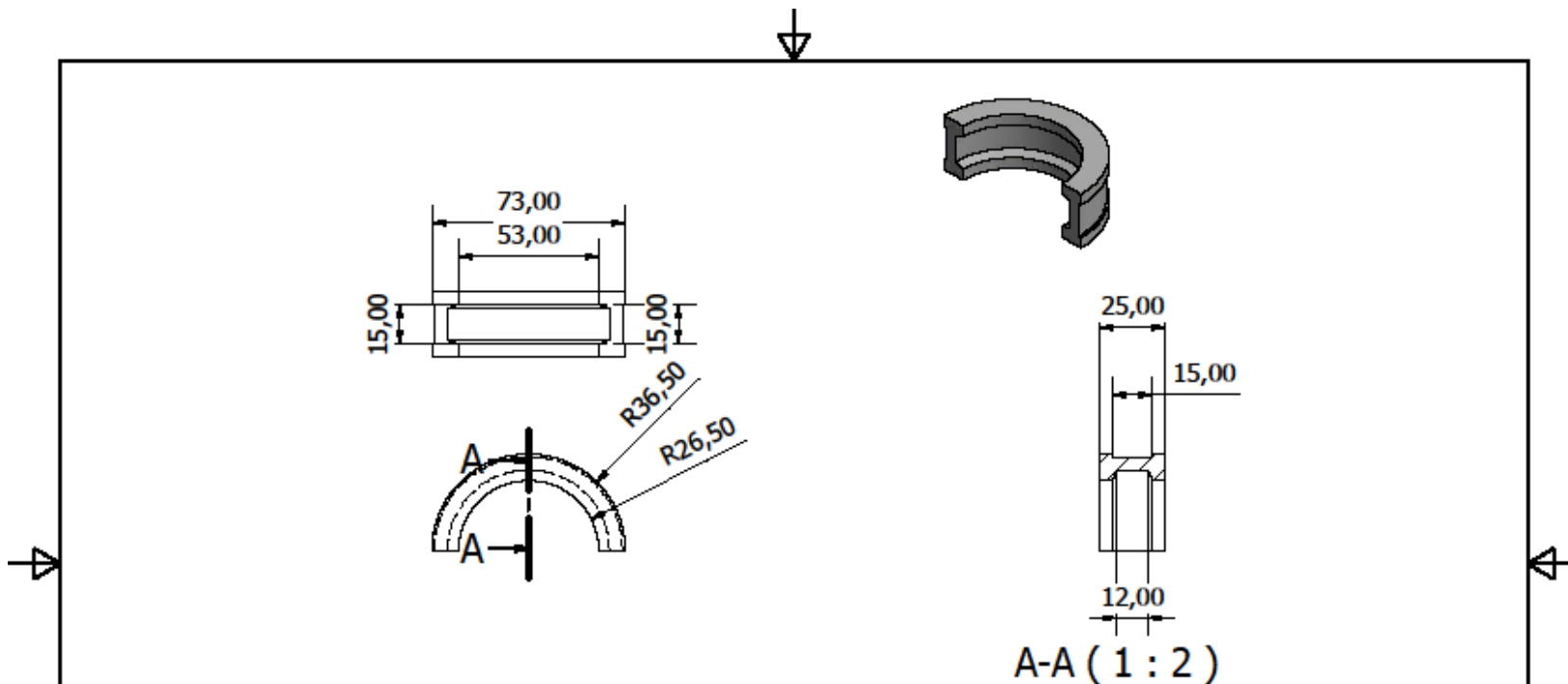
ESCALA:


1:2

PLANO Nº

7

REVISÓ:



		UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍA <small>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA</small>	
		PROYECTO: IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA LABORATORIO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	
NOMBRE:		ABRAZADERA PUENTE	
ELABORÓ: MARIA ALEJANDRA BERMUDEZ MONTAÑO ERIKA DAYANA BERNAL ARAGÓN		FECHA: 2017/11/28	
ESCALA: 1:2	PLANO Nº 8	REVISÓ:	

ANEXO C.

RESULTADOS MONITOREO DE TEMPERATURA PARA LAS CEPAS SELECCIONADAS CON EL SOFTWARE DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

Temperatura *Pseudomonas aeruginosa* durante 30 horas en intervalos de 1 hora

Tiempo – Temp	Valor de temperatura °C - Temp
0	38.22
1	37.24
60	38.22
120	37.24
180	37.73
240	36.75
300	36.75
360	39.69
420	41.16
480	41.16
540	39.2
600	39.2
660	38.71
720	39.2
840	42.14
900	40.67
960	40.67
1020	40.67
1080	38.22
1140	37.24
1200	37.73
1260	36.75
1320	37.24
1380	36.75
1440	37.24
1500	38.22
1560	37.24
1620	37.24
1680	36.75
1740	36.26
1800	36.26
PROMEDIO	38.31386452

Temperatura *Escherichia coli* durante 30 horas en intervalos de 1 hora

Tiempo - Temp	Valor de temperatura °C - Temp
0	36,75
1	37.24
60	35.28
120	35.77
180	35.28
240	36.26
300	36.75
360	38.71
420	63.21
480	37.73
540	37.73
600	39.69
660	39.69
720	40.18
840	38.22
900	39.2
960	39.2
1020	39.2
1080	36.26
1140	38.71
1200	38.22
1260	39.2
1320	39.2
1380	39.2
1440	38.71
1500	38.22
1560	38.71
1620	39.69
1680	37.24
1740	35.28
1800	39.2
PROMEDIO	37.97023876

ANEXO D.
COSTO CONSTRUCCIÓN CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA



SOPLADO DE VIDRIO NOC S.A.S.
 NIT 830.058.490-7
 CALLE 25F #85B-19 - BOGOTA
 2634770- 2637647
 sovinooc@yahoo.com

Factura de venta
No. 4693
 Régimen común
 Factura de venta original

SEÑOR(ES) ERIKA DAYANA BERNAL ARAGON	FECHA DE EXPEDICIÓN (DD/MM/AA) 21/09/2017
DIRECCIÓN	FECHA DE VENCIMIENTO (DD/MM/AA) 21/09/2017
CIUDAD	
TELÉFONO NIT 1.018.483.390	

Ítem	Precio	Cantidad	Descuento	Total
CELDA (DE COMBUSTION MICROBIANA CONSTA DE: 1 vaso reactor de 1 litro, esmerilados planos, salida con flanche, abrazadera, llave vacío, tapa con 3 salidas de rosca GL18 y abrazaderas; 1 vaso reactor de 1 litro, esmerilados planos, abrazadera, salida con flanche y llave de evacuación, tapa con 1 salida rosca GL18 y abrazadera- FABRICACION NOC)	\$1,750,000	1.00	0%	\$1,750,000

NOC S.A.S.
 NIT: 830.058.490 - 7
CANCELADO
Scott J. Lopez

Dos millones ochenta y dos mil quinientos pesos

SOLICITADO POR LA ESTUDIANTE DE LA FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA - ERIKA BERNAL PARA EL PROYECTO CELDA DE COMBUSTION MICROBIANA

Subtotal	\$1,750,000
Descuento	\$0
Subtotal	\$1,750,000
IVA (19.00%)	\$332,500
Total	\$2,082,500

Esta factura es válida en todos sus efectos a una letra de cambio de conformidad con el Art. 774 del código de comercio. Su pago que en caso de incumplimiento de esta obligación sea reportado a las centrales de riesgo, se cobrará en los términos de ley.

[Firma]
 ELABORADO POR

Enka Bernal Aragon
 ACEPTADA, FIRMA Y/O SELLO Y FECHA

Resolución Facturación por Computador N° 18762001036171 de 2016/ 11/ 01 AUTORIZADA 4501 AL 5000

Generado en www.alegra.comicobombia - Con Alegra ganas tiempo y tranquilidad

ANEXO E. ANÁLISIS DQO

LABORATORIOS PRODYCON S.A.S.

Bogotá D.C., 27/11/2017 N.I.T. 103,246,748-4
Solicitante : Leonardo Colmenares Valero
Telefonos: 3143379258 **FAX :**
Dirección: Cra 51 # 167 - 50 Int 11 Apto 204



RESOL. No. 0860/27-04-2017



NIT. 800,070,853 - 7

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO MUESTRA **168532**

Fecha Recepción: 21/11/2017

DATOS DE RECEPCION DE LA MUESTRA

Página 1 de 3

OBSERVACIONES :

Muestra tomada por el cliente.

Cadena de Custodia **Fecha toma** 20/11/2017 **Departamento:** BOGOTA **Municipio:** BOGOTA D.C.
Datos de Campo **Hora toma:** 16.00 **Coordenadas:**
Preservación **Monitoreo:** Cliente **Sitio** TRIPTICASA DE SOYA **Monitoreo**
Plan Muestral **Nombre plan:**

Parámetro de Análisis	Reproceso	Método	LC	Incertidumbre Combinada	Resultado	Unidades
A-DQO Rango Medio (Colorimétrico) ®		SM 5220 D	100	0.02785446	23520	mg/L O2

Nota: El resultado de este análisis es único y solo valido con el sello seco del Laboratorio. Queda totalmente prohibida la reproducción del mismo y solamente son validas las copias autorizadas con el sello seco del laboratorio. Este reporte aplica unicamente a la muestra analizada. Los valores de incertidumbre reportados corresponden a incertidumbre combinada (uc). Para expandir aplique: k*uc*Concentración. El factor de cobertura es k=2 con un nivel de confianza del 95%.

*: Identifica en donde se generó reproceso dentro del reporte de resultados por causa de PQR, PQR: Preguntas, quejas o reclamos. La información asociada a estas muestras (Cadenas de custodia) reposaran en los archivos de Prodycon S.A.S. por un año.

Observaciones :

Firma Autorizada:

Gerente General
Representante Legal

LABORATORIOS PRODYCON S.A.S

Parámetros Acreditados ISO IEC 17025 por IDEAM Resolucion 3567/2014 Identificados con ® al frente. Plan de Muestreo; Cadena de Custodia y Datos de Campo, en Formatos anexos, identificados con el número de muestra y disponibles cuando el cliente los solicite.

LABORATORIOS PRODYCON S.A.S.

Bogotá D.C., 27/11/2017 **N.I.T.** 103,246,748-4
Solicitante : Leonardo Colmenares Valero
Telefonos : 3143379258 **FAX :**
Dirección: Cra 51 # 167 - 50 Int 11 Apto 204



RESOL. No. 0860/27-04-2017



NIT. 800,070,853 - 7

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO MUESTRA 168533

Página 2 de 3

Fecha Recepción: 21/11/2017

DATOS DE RECEPCION DE LA MUESTRA

Cadena de Custodia **Fecha toma** 18/11/2017 **Departamento:** BOGOTA **Municipio:** BOGOTA D.C.
Datos de Campo **Hora toma:** 15.00 **Coordenadas:**
Preservación **Monitoreo:** Cliente **Sitio** E-COLI BLNACO
Plan Muestral **Nombre plan:** **Monitoreo**

OBSERVACIONES :
 Muestra tomada por el cliente.

Parámetro de Análisis	Reproceso	Método	LC	Incertidumbre Combinada	Resultado	Unidades
A-DQO Rango Medio (Colorimétrico) @		SM 5220 D	100	0.02785446	21960	mg/L O2

Nota: El resultado de este análisis es único y solo valido con el sello seco del Laboratorio. Queda totalmente prohibida la reproducción del mismo y solamente son validas las copias autorizadas con el sello seco del laboratorio. Este reporte aplica unicamente a la muestra analizada. Los valores de incertidumbre reportados corresponden a incertidumbre combinada (uc). Para expandir aplique: k*uc*Concentración. El factor de cobertura es k=2 con un nivel de confianza del 95%.
 *: Identifica en donde se generó reproceso dentro del reporte de resultados por causa de PQR, PQR: Preguntas, quejas o reclamos.
 La información asociada a estas muestras (Cadenas de custodia) reposaran en los archivos de Prodycon S.A.S. por un año.

Observaciones :
Firma Autorizada:


 Gerente General
 Representante Legal

LABORATORIOS PRODYCON S.A.S

Parámetros Acreditados ISO IEC 17025 por IDEAM Resolucion 3567/2014 Identificados con @ al frente. Plan de Muestreo; Cadena de Custodia y Datos de Campo, en Formatos anexos, identificados con el número de muestra y disponibles cuando el cliente los solicite.

LABORATORIOS PRODYCON S.A.S.

Bogotá D.C., 27/11/2017 N.I.T. 103,246,748-4
 Solicitante : Leonardo Colmenares Valero
 Telefonos: 3143379258 FAX :
 Dirección: Cra 51 # 167 - 50 Int 11 Apto 204



REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO MUESTRA 168535

Fecha Recepción: 21/11/2017

DATOS DE RECEPCION DE LA MUESTRA

Página 3 de 3

OBSERVACIONES :

Muestra tomada por el cliente.

Cadena de Custodia Fecha toma: 18/11/2017 Departamento: BOGOTA Municipio: BOGOTA D.C.
 Datos de Campo Hora toma: 15.00 Coordenadas:
 Preservación Monitoreo: Cliente Sitio PSEUDOMONA BLANGO
 Plan Muestral No Asignado Monitoreo
 Nombre plan:

Parámetro de Análisis	Reproceso	Método	LC	Incertidumbre Combinada	Resultado	Unidades
A-DQO Rango Medio (Colorimétrico) ®		SM 5220 D	100	0.02785446	20640	mg/L O2


Nota: El resultado de este análisis es único y solo valido con el sello seco del Laboratorio. Queda totalmente prohibida la reproducción del mismo y solamente son validas las copias autorizadas con el sello seco del laboratorio. Este reporte aplica unicamente a la muestra analizada. Los valores de incertidumbre reportados corresponden a incertidumbre combinada (uc). Para expandir aplique: k*uc*Concentración. El factor de cobertura es k=2 con un nivel de confianza del 95%.
 *: Identifica en donde se generó reproceso dentro del reporte de resultados por causa de PQR, PQR: Preguntas, quejas o reclamos.
 La información asociada a estas muestras (Cadenas de custodia) reposaran en los archivos de Prodycon S.A.S. por un año.

Observaciones :
Firma Autorizada:

Gerente General
 Representante Legal

LABORATORIOS PRODYCON S.A.S

Parámetros Acreditados ISO IEC 17025 por IDEAM Resolucion 3567/2014 Identificados con ® al frente. Plan de Muestreo; Cadena de Custodia y Datos de Campo, en Formatos anexos, identificados con el número de muestra y disponibles cuando el cliente los solicite.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotras, **María Alejandra Bermúdez Montaña** y **Erika Dayana Bernal Aragón** en calidad de titulares de la obra **Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica**, elaborada en el año 2017, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C., a los 16 días del mes de Febrero del año 2018.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
María Alejandra	Bermúdez Montaña
Documento de identificación No	Firma
1.026.296.976	Alejandra Bermúdez M.

Autor 2

Nombres	Apellidos
Erika Dayana	Bernal Aragón
Documento de identificación No	Firma
1.018.483.390	Erika Bernal Aragón.