

Diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de cátodo
expuesto a escala piloto.

Marcela Alejandra Mera Castro

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CALI
2015

Diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de cátodo
expuesto a escala piloto.

Marcela Alejandra Mera Castro

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero Químico

Director

William Hernando Lizcano Valbuena, Dr. Sc.

Codirectores

Andrés Felipe Rodríguez Marmolejo, Ing. Qco.

Enrique Bravo Montaña, Dr. Sc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CALI
2015

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DIRECTOR

FIRMA COORDINADOR

FIRMA CALIFICADOR

Santiago de Cali, 26 de Enero de 2015

AGRADECIMIENTOS

Es satisfactorio para mí dar estos agradecimientos a las personas que con sus consejos, paciencia y dedicación me han guiado, ayudándome no sólo a culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida, también dándome lecciones de vida. Por esto y más mil gracias al profesor William Lizcano mi director de tesis, a los compañeros del Grupo de Investigación de Electroquímica Aplicada y Superficies especialmente a Pablo Micolta Méndez por sus consejos. A todo el personal del laboratorio de Ingeniería Química que me abrieron sus puertas brindándome los medios necesarios para culminar mis mediciones.

Gracias a la UNIVERSIDAD DEL VALLE por su respaldo y permitirme adquirir una infinidad de conocimientos.

Por último, pero no en importancia, gracias a mi madre por su apoyo incondicional, su cariño y su ejemplo, por hacer de mí lo que soy. Gracias a mi abuela Bertha por todas esas oraciones y bendiciones que me reconfortan en momentos de angustia. A mi tío José por abrirme las puertas de su taller para que yo pudiera construir mi proyecto. A todos y cada uno de mis familiares por estar siempre pendientes de mí, aconsejándome y apoyándome. Todo esto es gracias a ustedes.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	12
2.	MARCO TEÓRICO	13
2.1.	Celdas combustibles	13
2.2.	Antecedentes	13
2.3.	Métodos de análisis de las CCMs	17
2.3.1.	Potencial Redox	18
2.3.2.	Potencia	19
2.3.3.	Curvas de polarización y potencia	20
2.3.4.	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	20
3.	METODOLOGÍA	21
3.1.	Diseño de la celda de combustible microbiana	21
3.1.1.	Primer diseño de CCM	21
3.1.2.	Segundo diseño de CCM	23
3.2.	Construcción de la CCM de 1 L	23
3.3.	Recolección de lodos de tratamiento y preparación del inóculo	24
3.3.1.	Caracterización fisicoquímica del lodo	25
3.4.	Determinación de la eficiencia de la CCM	25
3.4.1.	Evaluación del desempeño electroquímico	25
3.4.2.	Demanda química de oxígeno (DQO)	26
3.5.	Construcción de una CCM de 10 L	26
4.	RESULTADOS	29
4.1.	Celda de 1 L	29
4.1.1.	Eficiencia de remoción	35

4.2.	Celda de 10 L	37
4.2.1.	Análisis electroquímicos	40
4.2.2.	Análisis de remoción	43
4.3.	Análisis comparativo	44
4.3.1.	Futuro de las CCM en Colombia	47
5.	CONCLUSIONES	50
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Potenciales de algunas parejas redox	19
Tabla 2: Conductividad en la CCM de 1 L	33
Tabla 3: Mediciones de Turbiedad, COT y DQO. CCM 1 L	35
Tabla 4: Propiedades y suposiciones de simulación	37
Tabla 5: pH, Conductividad y Temperatura. CCM 10 L	41
Tabla 6: Turbiedad, COT y DQO. CCM 10 L	43
Tabla 7: Densidad de potencia máxima alcanzados en diferentes tipos de CCM	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista exterior, primer diseño propuesto de CCM	21
Figura 2. Vista detallada, primer diseño propuesto de CCM	22
Figura 3. Vista detallada segundo prototipo propuesto de CCM	23
Figura 4. Sistema de medición voltaje y corriente	25
Figura 5. CCM con capacidad de 10 L	27
Figura 6. Base soporte de la CCM	28
Figura 7. CCM de 1 L	30
Figura 8. Potencial de circuito abierto vs tiempo. Celda de 1 L	31
Figura 9. pH Vs Tiempo, celda inicial de 1 L	32
Figura 10. Curva de Potencial de celda vs j y Densidad de Potencia vs j. Celda de 1 L	34
Figura 11. Turbiedad antes y después de 30 días. CCM 1L	36
Figura 12. Tensiones en la celda	38
Figura 13. Desplazamiento o deformación	39
Figura 14. CCM de 10 L	39
Figura 15. Potencial de circuito abierto, celda de 10 L	40
Figura 16. Curvas de Potencial de celda vs j y Densidad de corriente vs j. Celda de 10 L	42
Figura 17. Turbiedad antes y después de 30 días de tratamiento. CCM 10 L	44

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

°C	Grado Centígrado
μS	microSiemens
A	Amperio
Ag	Plata
AgCl	Cloruro de plata
CCM	Celda de Combustible Microbiana
CCMs	Celdas de Combustible Microbianas
cm	Centímetro
COT	Carbón Orgánico Total
Cr	Cromo
DQO	Demanda Química de Oxígeno
E_{cel}	Voltaje de la celda medido a diferentes resistencias externas
E_{h7}	Potencial redox de la celda a pH=7
I	Corriente
j	Densidad de corriente
K	Kelvin
KCl	Cloruro de potasio
KΩ	Kiloohmio

L	litro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
MIP	Membrana de intercambio protónico
mg	miligramos
mm	milímetro
mV	milivoltio
MΩ	Megaohmio
N	Newton
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
P	Potencia
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
pH	Potencial de hidrógeno
ppm	Partes por millón
Pt	Platino
SIN	Sistema Interconectado Nacional
U	Uranio
W	Vatio
ZNI	Zona no interconectada
ΔE	Diferencia de potencial

Ω

Ohmio

1 INTRODUCCIÓN

El aumento en el crecimiento económico y el desarrollo social están dando lugar a una gran brecha entre la demanda de energía y la disponibilidad de los combustibles fósiles. El desarrollo de reactores electroquímicos basados en celdas de combustible microbianas representa un nuevo enfoque mediante el cual a partir del tratamiento de aguas residuales se puede obtener como valor agregado energía eléctrica, con lo cual se intenta de alguna manera disminuir esta brecha.

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos que se encargan de convertir energía bioquímica a energía eléctrica mediante microorganismos que oxidan sustratos biodegradables tales como glucosa, acetato o materia orgánica presentes en aguas residuales. Las bacterias obtienen la energía transfiriendo electrones desde un donador de electrones, hacia un aceptor de electrones, como el oxígeno. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial entre el donador y el aceptor, mayor será la ganancia energética para la bacteria y generalmente mayor será su tasa de reproducción y por tanto de conversión de la materia orgánica.

Este proyecto en particular se enfoca en mejorar las características estructurales de las celdas que se están implementando actualmente realizando el diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de cátodo expuesto a un volumen de 0,01 m³. Para ello se construyó una celda a escala laboratorio en la cual se realizaron los diagnósticos que permitieron establecer las condiciones adecuadas frente a las cuales se obtiene una remoción de materia orgánica considerable del lodo tratado, por tanto este proyecto permite tener un acercamiento con procesos de tratamiento de aguas residuales a una mayor escala.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Celdas combustibles.

Las celdas de combustible son comparables a una celda electrolítica o una batería donde productos químicos se oxidan o se reducen electroquímicamente para producir electricidad (De Paula & De Paula 2007) .

Estas celdas contienen dos electrodos (ánodo y cátodo) que es donde se llevan a cabo las reacciones electroquímicas y los cuales están separados por un electrolito, tal como un puente de sal, o una membrana. Las celdas de combustible no contienen reactivos almacenados, estos se alimentan a la celda de forma continua. Por lo tanto, el flujo continuo de los reactivos permite un suministro continuo de corriente eléctrica, siempre y cuando los electrodos y la membrana de intercambio de protones permanezcan intactos (Castells & Gracia 2012).

2.2. Antecedentes

La investigación sobre celdas de combustible microbianas se inició en 1911 por el científico inglés M.C. Potter, quien descubrió una diferencia de potencial cuando en uno de los compartimientos de la celda tenía una solución estéril de nutrientes de sal y en el otro compartimiento tenía microbios metabolizando la solución. Con la diferencia de potencial que se creaba en dicho sistema, Potter era capaz de obtener corriente cuando aplicaba una carga entre los dos compartimientos (Potter et al. 1911).

En la década de los 80, el interés alrededor de las celdas de combustible microbianas creció de forma significativa y las bases reguladoras del consorcio

microbiano como catalizador anódico empezaron a ser investigadas en trabajos llevados a cabo con cultivos puros, mediadores para la transferencia de electrones entre bacterias y electrodos y fuentes de carbono no complejas (Thurston et al. 1985).

Durante los años 90 la necesidad de comprender estos sistemas hizo proliferar la experimentación con distintas configuraciones de reactor y combinaciones de fuentes de carbono y las eficiencias coulombicas conseguidas aumentaron de forma considerable. Uno de los estudios realizados consistió en desarrollar electrolitos de polímero sólido usando Nafion y ánodos de carbón activado para facilitar la oxidación de sulfuros y la cogeneración de electricidad, donde se obtuvo una densidad de corriente de $1,98 \text{ mA/cm}^2$ (Cooney et al. 1996).

Las CCMs se distinguen de otros sistemas de generación de energía porque: operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a muy bajas temperaturas; producen menor cantidad de CO_2 que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar energía, por lo que las pocas emisiones de este gas no requieren ningún tipo de tratamiento; no necesitan aporte de energía siempre que el cátodo abiótico sea aireado pasivamente o sea un biocátodo (Revelo et al. 2013); en el futuro podrían ser utilizadas en lugares remotos donde haya demanda de consumos básicos de energía eléctrica. El potencial de estos dispositivos es enorme, lo que ha creado grandes expectativas en la comunidad científica ya que es posible producir energía limpia mediante la explotación de la biomasa que existe en las aguas residuales domésticas e industriales. Al utilizar la materia orgánica de las aguas residuales como combustible simultáneamente con la producción de energía, se consigue una depuración de las aguas contaminadas. Adicionalmente, el estudio de biocátodos capaces de usar no solamente oxígeno sino también otros contaminantes como posibles aceptores de electrones, permite la remoción de nutrientes y la biorremediación conjuntamente con la generación de electricidad (Huang et al. 2010).

Algunas importantes aplicaciones que se han descrito son el robot Eco Bot II que permite la realización de funciones de movimiento, sensado, computación y comunicación, este dispositivo tiene incorporado una CCM para obtener un sistema eléctricamente autónomo (Du et al., 2007); el tratamiento de aguas residuales a pequeña escala para la eliminación de proteínas y otro tipo de compuestos químicos presentes en agua (He et al. 2013). Las posibles aplicaciones de CCMs de biocátodos están siendo recientemente exploradas, entre ellas sobresalen: biorremediación de U (VI) in situ, reducción de Cr (VI), eliminación de cloro de diversos solventes clorados, reducción de perclorato y principalmente reducción de nitrato (Huang et al. 2010). Por otra parte se explora la reducción de oxígeno y la producción de combustibles a través de la electrosíntesis microbiana en la cual se reduce el CO₂ a compuestos orgánicos y la producción de hidrógeno (Lovley 2011).

Los microorganismos capaces de aceptar electrones directamente a partir de electrodos se han denominado coloquialmente electrodo-oxidantes (Rittmann 2006) o más formalmente electrótrofos (Lovley 2011); en este caso, los electrones que reciben del cátodo son transferidos selectivamente a aceptores finales con altos potenciales redox que captan del medio (Mook 2013), tales como protones, CO₂, nitrato, fumarato, Cr (VI), U (VI), solventes clorinados, entre otros (Lovley 2011). El mecanismo mencionado anteriormente permite visualizar un amplio rango de aplicaciones principalmente en biorremediación, debido a que muchos de los aceptores finales en su estado reducido pueden ser más amigables para el ambiente, por ejemplo, la reducción del nitrato contribuye a la remoción de compuestos nitrogenados o la reducción del Cr (IV) proveniente de aguas residuales de la industria del cuero hasta su forma menos tóxica Cr (III) (Huang et al, 2011). Además, en el sistema de biocátodo se pueden producir biocombustibles (H₂, butanol, CO₂ reducido, entre otros) u otros compuestos químicos de interés (Lovley 2011).

Los principales factores que influyen en la generación de energía en las CCM son las vías metabólicas que gobiernan el flujo de electrones y protones, la influencia del sustrato y el potencial del ánodo. A altos potenciales anódicos, las bacterias pueden usar un metabolismo oxidativo y transferir electrones al ánodo, sin embargo, si el potencial del ánodo disminuye los electrones probablemente se depositan sobre aceptores de electrones alternativos (sulfato, nitrato, entre otros) y en su ausencia, ocurrirá la fermentación (Rabaey & Verstraete 2005).

Recientemente se ha demostrado en cultivos mixtos que los microorganismos fermentativos pueden tener poca o nula capacidad para transferir electrones al ánodo, sin embargo, su metabolismo contribuye a la generación de energía en la CCM, ya que aportan subproductos que pueden ser utilizados como sustratos por otras poblaciones microbianas, permitiendo el establecimiento de interacciones sintróficas (Richter 2008). Se han estudiado diversas publicaciones que caracterizan la comunidad microbiana de los sistemas bioelectroquímicos, al destacar procesos sintróficos específicos que capacitan a una biopelícula para la generación de corriente eléctrica a partir de un sustrato (Kiely et al. 2011); la sintrofia consiste en que ciertos microorganismos hidrolizan y fermentan compuestos orgánicos complejos y otros utilizan los subproductos para la generación de corriente, estableciéndose una estructura jerárquica con microorganismos dominantes dependiendo del sustrato empleado.

El sustrato es uno de los aspectos más importantes de la CCM porque constituye el combustible a partir del cual se genera la energía. En la literatura científica se encuentran diversos trabajos en los que se emplea una gran variedad de sustratos, desde compuestos puros hasta mezclas complejas (Liu et al. 2009). En los primeros años, sustratos simples como glucosa y acetato eran de uso general, pero en los últimos años las investigaciones se centran en la utilización de sustratos menos convencionales con el fin de utilizar la biomasa presente en aguas residuales de diverso tipo y adicionalmente depurarlas y generar energía.

Los compuestos puros se pueden degradar de manera más simple lo que permite obtener mayor generación de energía e hidrógeno, además a nivel experimental es recomendable su uso porque se facilita la evaluación de condiciones operacionales de la CCM tales como, la eficiencia coulombica, la densidad de potencia y la resistencia interna (Pant et al. 2010).

Sin embargo, el uso de sustratos complejos en una CCM es de gran interés porque, además de ser fuentes de energía, estos se pueden degradar y/o biorremediar antes de su descarga al medio ambiente. A diferencia de los compuestos puros los sustratos complejos requieren para su degradación una comunidad microbiana diversa y electroquímicamente activa, cuyas poblaciones se van seleccionando dependiendo del tipo de sustrato (Pant et al. 2010). Como ejemplos de este tipo de sustratos se pueden explorar: aguas residuales provenientes del procesamiento de frutas y vegetales, suero de queso, melazas de destilerías, aguas residuales de biorrefinerías, aguas residuales de industrias farmacéuticas con contaminantes recalcitrantes, residuos agrícolas, entre otros. Además, se ha demostrado que las CCMs pueden utilizar como sustratos no sólo material orgánico degradable, sino también material resistente a la biodegradación (Logan & Regan 2006).

2.3. Métodos de análisis de las CCMs

El desempeño electroquímico de las CCMs se ve reflejado en: la diferencia de potencial (ΔE) entre los electrodos, la densidad de corriente (A/m^2) y la densidad de potencia (W/m^2) expresados en relación al área superficial de los electrodos empleados. Por otra parte el desempeño microbiológico puede ser evaluado mediante análisis de conductividad, pH, turbiedad, demanda química de oxígeno (DQO) y carbón orgánico total disuelto (COT).

2.3.1. Potencial Redox

El potencial redox de una celda es una medida de la diferencia de energía electrónica entre los dos electrodos. La energía electrónica de cada electrodo está relacionada con la fuerza con la que se produce la reacción en la interfase electrodo - disolución. La unidad en la que se mide es el voltio (Ebbing & Gammon 2010).

En ambientes de agua dulce en equilibrio con el oxígeno atmosférico, se registran valores de potencial redox alrededor de +800 mV (0.8 V), mientras que para aguas oceánicas superficiales generalmente oscila entre +400 y +435 mV (a un pH entre 7.6 y 8.3). Cuando la tensión de oxígeno en dichos ambientes disminuye, el potencial también baja ya que la actividad metabólica microbiana puede alterar el potencial redox como resultado de una respiración aeróbica intensa y de la secreción de sustancias reductoras. La tabla 1 muestra algunos rangos de potenciales para parejas que presentan reacciones de reducción - oxidación (redox) (Atlas & Bartha 1981)(Lynch & Poole 1979).

Es importante destacar que los métodos utilizados y los dispositivos empleados determinan las diferencias de potencial (entre dos electrodos) y no el valor absoluto del potencial de un único electrodo. Por esta razón y con el fin de tener un listado útil de potenciales de electrodo, es necesario tomar un electrodo de referencia a partir del cual se puedan establecer los potenciales de los demás.

Tabla 1: Potenciales de algunas parejas redox. Adaptado de (Atlas & Bartha 1981)(Lynch & Poole 1979)

<i>Pareja redox</i>	<i>Potencial (E_{h7})</i> (mV)	<i>Oxígeno Disuelto</i> (mg/L)
$NO_3^- - NO_2^-$	+450 a +400	4,0
$NO_2^- - NH_3$	+400 a +350	0,4
$Fe^{3+} - Fe^{2+}$	+300 a +200	0,1
$SO_4^{2-} - S^{2-}$	-150 a -200	0,0
$CO_2 - CH_4$	-250 a -300	0,0

E_{h7} : Potencial Redox de la celda a pH=7

2.3.2. Potencia.

La electricidad dentro de una celda es transportada por el movimiento de los iones; para medir y evaluar el desempeño de dichos movimientos es esencial calcular la potencia de salida lo cual se logra mediante la siguiente ecuación:

$$P = I \times E_{cel} \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo,

P : Potencia

I : Intensidad de la corriente

E_{cel} : Voltaje de la celda medido a diferentes resistencias externas

Cuando se transporta corriente continua a través de una celda electroquímica, el potencial de celda medido difiere, generalmente, del obtenido mediante cálculos termodinámicos. Esta desviación se puede atribuir a cierto número de fenómenos

entre los que se incluye la resistencia ohmica y diversos efectos de polarización. Por lo general estos fenómenos reducen el potencial de la celda.

Para poder conocer la eficiencia con la cual se generó potencia en el sistema, es necesario normalizar la potencia de salida con la superficie del ánodo, la superficie del cátodo o cualquier otra característica de interés de la celda (Logan 2007).

2.3.3. Curvas de polarización y potencia.

Las curvas de polarización (o corriente-voltaje) se pueden obtener tanto para los electrodos por separados como para el sistema en su conjunto (la celda). A fin de caracterizar y determinar la potencia eléctrica máxima que se puede obtener de una determinada celda, es necesaria la obtención de la curva de polarización de la misma. Dicha curva se puede calcular teóricamente si se conocen las curvas de polarización de los electrodos por separado, pero también se puede determinar experimentalmente mediante un sistema de medición. Para esto la resistencia externa del circuito es cambiada con el fin de obtener un voltaje diferente y por lo tanto una nueva corriente, la cual debe ser normalizada por el área superficial de uno de los electrodos (usualmente el ánodo). (Logan & Regan 2006)(Logan 2007).

2.3.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Es un parámetro analítico de contaminación que mide el contenido de materia oxidable en una muestra de agua mediante oxidación química. Representa el contenido de materia orgánica total de la muestra, oxidable por dicromato de potasio en solución ácida (Roldán Pérez & Ramírez Restrepo 2008).

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño de la celda de combustible microbiana.

Con el fin de obtener mejores resultados en cuanto a degradación de materia orgánica y producción de energía, se diseñaron dos CCM de una sola cámara con cátodo expuesto en los cuales el área superficial de los cátodos es mayor con respecto al área superficial de los ánodos, ya que se ha encontrado que la densidad de potencia es inversamente proporcional al área superficial del ánodo (Jeon et al. 2013).

3.1.1. Primer diseño de CCM.

En este primer diseño, dos caras de la celda son láminas perforadas de aluminio con incrustaciones de grafito particulado (cátodos), que están cubiertos por una malla plástica que sirve de aislante eléctrico y está perforada para permitir el paso de aire al grafito. Al interior de la celda hay un arreglo de barras de grafito soportadas sobre láminas de acrílico movibles para facilitar su posterior limpieza (ánodos). Las barras de grafito están conectadas por medio de alambre de cobre, al igual que las láminas de los cátodos. En las figuras 1 y 2 se muestra en detalle las características de éste diseño.

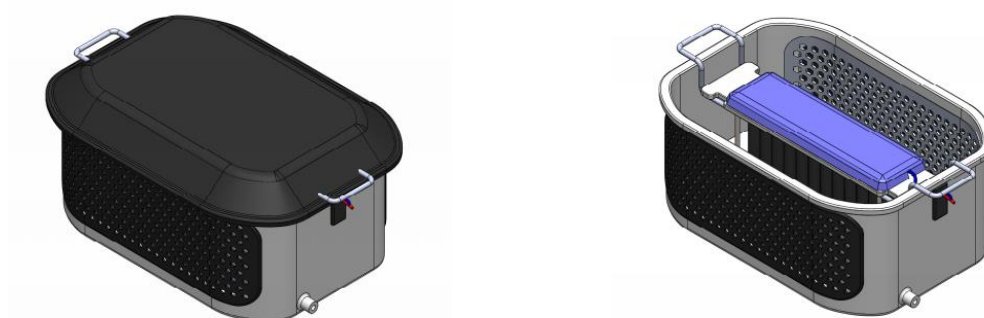
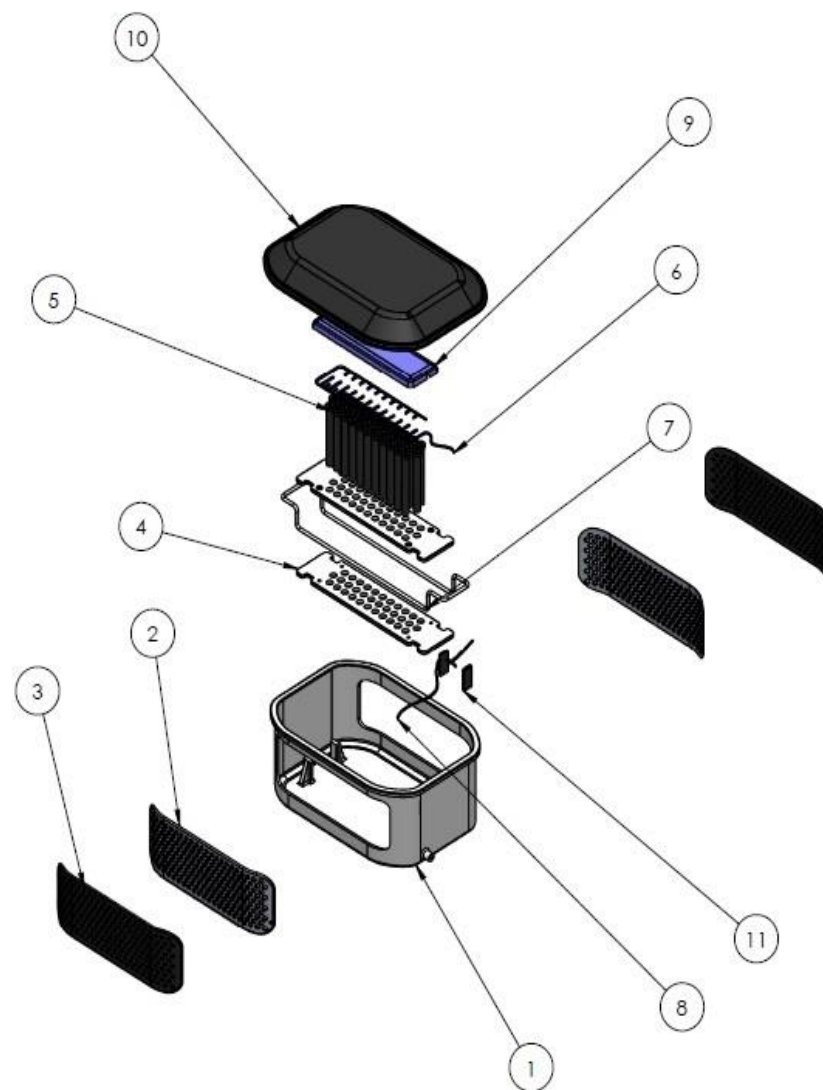


Figura 1. Vista exterior, primer diseño propuesto de CCM.



ITEM	DESCRIPCIÓN
1	Cuerpo celda
2	Malla de aluminio
3	Malla plástica aislante
4	Soporte grafito
5	Barras de grafito
6	Cable de cobre para ánodos
7	Estructura de soporte de sistema de ánodos
8	Cable de cobre para cátodos
9	Protector de los cables del ánodo
10	Tapa de la celda
11	Protector de los cables del cátodo

Figura 2. Vista detallada, primer diseño propuesto de CCM

3.1.2. Segundo diseño de CCM.

El segundo diseño propuesto es similar al primero, pero en lugar de grafito particulado, se incrustaron barras de grafito en las paredes de la celda como cátodos, mientras la configuración de los ánodos es igual al primer diseño propuesto. El material de la celda es acrílico. En la figura 3 se aprecia el diseño descrito para esta segunda CCM.

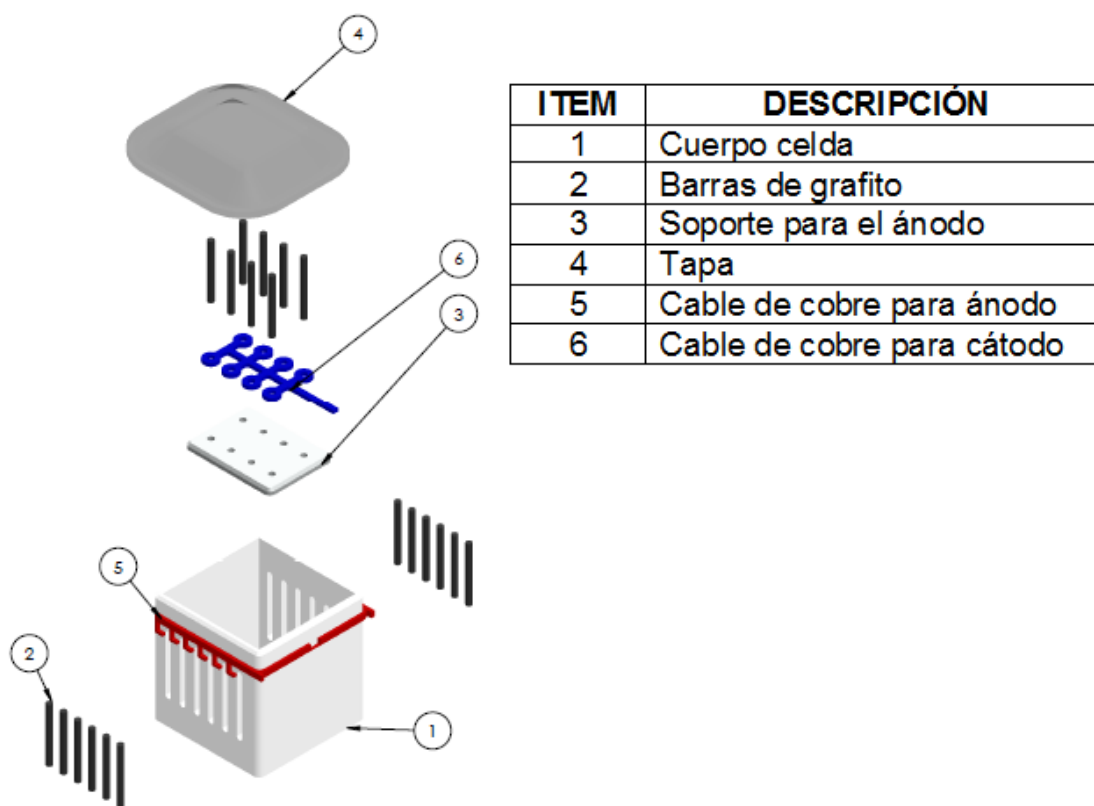


Figura 3. Vista detallada segundo prototipo propuesto de CCM.

3.2. Construcción de la CCM de 1 L.

Una vez elegido el diseño a realizar se procedió a construir la celda a escala laboratorio con capacidad de 1 L. Para la cual se utilizaron láminas de acrílico

blanco de 11 cm x 11 cm y 5 mm de espesor; barras de grafito de 5 mm de diámetro marca SOLDARCO® de 8 cm de largo para los cátodos y de 4 cm para los ánodos, alambre de cobre con recubrimiento plástico y para pegar las láminas de acrílico, se utilizó soldadura epóxica y silicona fría para asegurar las barras de grafito a las láminas de acrílico.

Antes de construir la celda, las barras de grafito que formarían el ánodo de la misma fueron sometidas a un pretratamiento que consistió en calentar las barras de grafito en una mufla a 450 °C durante una hora, posteriormente se sacaron y fueron sumergidas en una solución de ácido nítrico al 0,5 M por 6 horas y luego fueron llevadas nuevamente a la mufla por 30 minutos a una temperatura de 100 °C. Para terminar fueron lavadas con agua destilada cerca a su punto de ebullición.

Los cátodos de la celda también fueron tratados previamente con agua destilada cerca a su punto de ebullición, posteriormente fueron secados a 100 °C durante 15 minutos para ser recubiertos con catalizador de platino soportado en carbón (0,1 mgPt/cm²) usando Nafion como aglutinante.

3.3. Recolección de lodos de tratamiento y preparación del inóculo.

El agua y el lodo al cual se le realizó el tratamiento se obtuvo del lago ornamental de la Universidad del Valle sede Meléndez. Para su recolección se emplearon dos recipientes plásticos. Las muestras del lodo fueron tomadas de un lado del lago a una profundidad de 50 cm aproximadamente.

Para la preparación del inóculo se adicionó en la celda lodo hasta una altura de 4 cm y el resto de la celda se llenó con el agua recolectada. La celda se dejó en reposo durante una semana antes de iniciar mediciones en ella permitiendo así la

formación de la capa bacteriana sobre los ánodos. La celda fue conectada a una resistencia de 1 K Ω para evitar que se descargue rápidamente (Sacco et al.).

3.3.1. Caracterización fisicoquímica del lodo.

Con un medidor multiparamétrico se midió el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura de las muestras colectadas una vez llevadas al laboratorio. La turbiedad fue medida en un turbidímetro marca HACH y la medición del carbón orgánico total se realizó antes de iniciar y al finalizar la operación en las celdas. Para esta última medición se tomaron 30 mL de la muestra, se filtraron con filtros de membrana de 0,45 micras y posteriormente se llevó a un analizador de carbón orgánico total.

3.4. Determinación de la eficiencia de la CCM.

3.4.1. Evaluación del desempeño electroquímico.

Para evaluar el desempeño de la CCM fue necesario medir diariamente la corriente y el voltaje que se produjo en ella de manera simultánea y variando la resistencia, para lo cual se construyó en una lámina de acrílico un sistema que permitió conectar dos multímetros a la celda así como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Sistema de medición voltaje y corriente.

Con los datos de corriente y voltaje medidos se realizaron curvas de polarización y densidad de corriente mediante la técnica de resistencia variable. Las resistencias usadas para esta medición están en un rango entre 1,6 Ω y 0,36 M Ω . Para la toma de los valores de potencial de la celda y corriente, se esperó hasta que dichos valores fueran estables. Con el objetivo de conocer la evolución del potencial en cada uno de los electrodos, se utilizó un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) con solución 3 M de KCl, para registrar los valores de potencial de electrodo diarios antes de realizar las mediciones con las diferentes resistencias mencionadas anteriormente.

3.4.2. Demanda química de oxígeno (DQO).

Una característica de las CCM es su capacidad de degradar materia orgánica contaminante de las aguas por tanto para evaluar la eficiencia de ésta es necesario tomar la medida de la demanda química de oxígeno (DQO) para conocer la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas por medios químicos. Por tanto se realizó una curva de calibración y se midió el DQO antes y después del tratamiento en la celda. Este procedimiento se realizó siguiendo la norma ATSM D1252-06 método B.

3.5. Construcción de una CCM de 10 L.

Con base en el diseño realizado para la celda de 1 L y los resultados obtenidos en ella, se dibujó en el software de diseño SolidWorks un esquema para la celda con capacidad de 10 L en la cual se mantuvo la proporción entre el área superficial anódica respecto a la catódica y la distancia entre ellas, dando como resultado el esquema que se muestra en la Figura 5. Las dimensiones de la celda fueron 101 x 11 x 12 cm. Las barras de grafito tenían un diámetro de 5 mm. Las barras que conformaban los ánodos eran de 4 cm de largo y las barras de los cátodos eran de 5 cm de largo. El material de la celda es acrílico de 3 mm de espesor.

Adicional a esto, se realizó un estudio de fuerzas para saber cuáles serían los puntos donde el sistema sufriría mayor deformación por la presión del lodo y el agua del lago. Este estudio se realizó con una simulación en el software SolidWorks, lo que llevo a tomar la decisión de construir una base que sirviera de soporte a la celda y así evitar que se deformara. En la figura 6 se puede apreciar el diseño propuesto de la base.

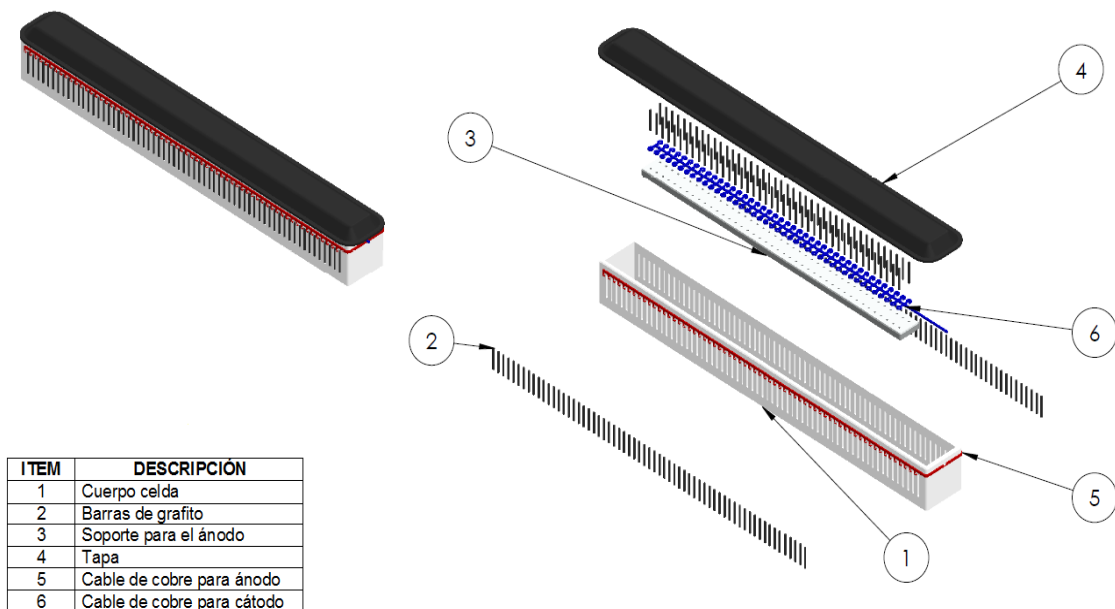


Figura 5. CCM con capacidad de 10 L.

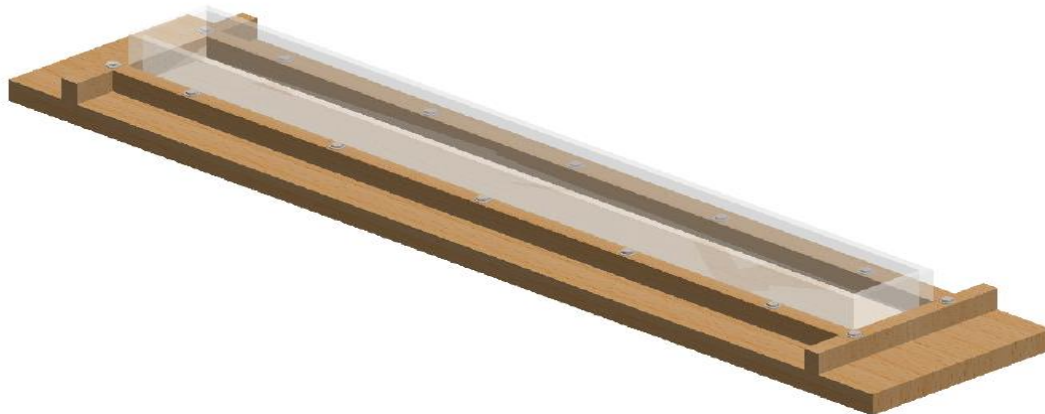


Figura 6. Base soporte de la CCM.

La base fue construida en madera y asegurada con clavos y colbon madera para darle firmeza a la estructura.

La recolección del lodo, la preparación del inóculo y la determinación de la eficiencia en la celda se realizó de la forma mencionada en los ítems 5,3 y 5,4 respectivamente.

4. RESULTADOS

Luego de analizar los dos diseños de CCM propuestos, se observó que con el primer diseño se podría lograr una mayor área superficial de cátodo, sin embargo este diseño, presentó un mayor riesgo de falla mecánica al tener un mayor número de piezas para ensamblar. Además que se debía establecer un tamaño de partícula para incrustar en la lámina de aluminio y esto sería una tarea tediosa, pues si no era posible conseguir comercialmente el grafito en esos tamaños, al intentar conseguir dicho tamaño a partir de un grafito más grande sería más el grafito que se desperdicia en dicha labor. Por este motivo se eligió la opción dos ya que esta presentó una mayor practicidad y es más económica que el primer diseño porque no necesita de láminas de aluminio ni malla aislante.

Ambos diseños fueron dibujados con grafitos incrustados en las paredes de la celda, para aumentar el área superficial del cátodo con respecto al ánodo y para conseguir una aireación natural del mismo, evitando así costos en aireación del cátodo con sistemas externos.

A continuación se muestran las experiencias y resultados obtenidos en el diseño, construcción e implementación de la celda seleccionada con capacidades de 1 L y 10 L.

4.1. Celda de 1 L.

En la construcción de este prototipo, se pudo evidenciar que las barras de grafito incrustadas en las paredes de la celda hacían contacto con el lodo, lo cual generaría problemas, pues las bacterias formarían una placa microbiana en ellas y no permitirían que cumplan su función como cátodo. Motivo por el cual se usó soldadura epóxica blanca para cubrir la parte inferior de las barras en el interior de la celda y prevenir así dicho contacto.



Figura 7. CCM de 1 L.

La celda fue operada durante 30 días ya que en este tiempo las bacterias han logrado estabilizar su metabolismo (Thurston et al. 1985) luego de estar una semana inoculando. Durante este periodo se registraron sus respectivos valores del potencial de circuito abierto usando el electrodo de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) como electrodo de referencia y los datos de corriente y voltaje obtenidos en la celda cuando eran sometidas a resistencias externas entre $1,6 \, \Omega$ y $0,36 \, M\Omega$.

Para corroborar los datos obtenidos las mediciones se realizaban 2 veces. En la Figura 8 se puede apreciar la gráfica de los potenciales de circuito abierto durante este tiempo.

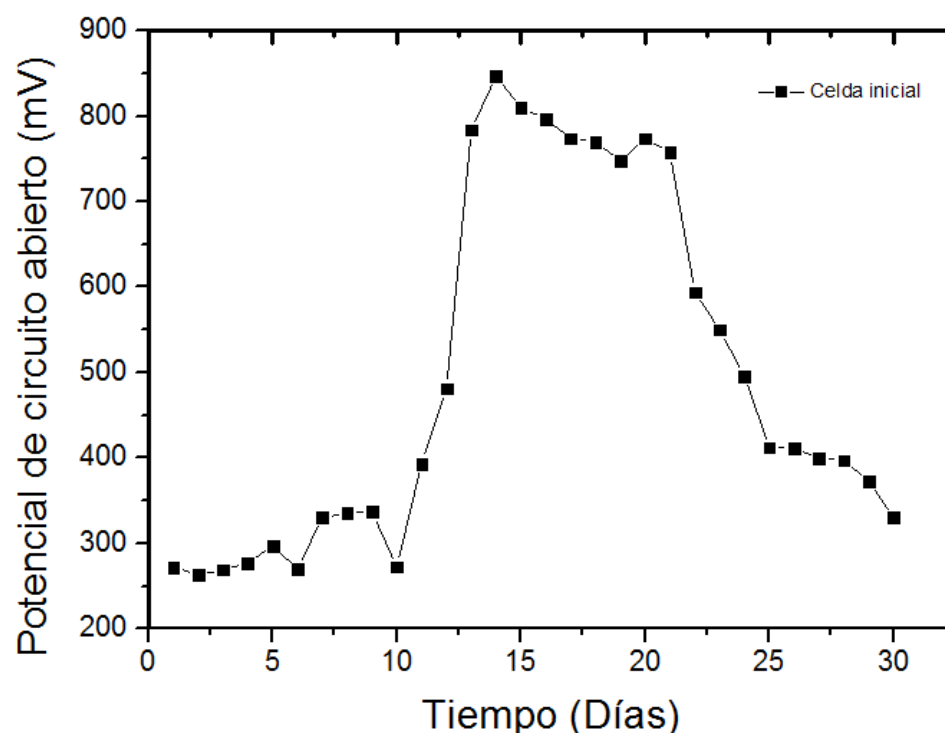


Figura 8. Potencial de circuito abierto vs tiempo. Celda de 1 L.

El gráfico de potencial de circuito abierto respecto al tiempo permite ver que la celda inicialmente va aumentando su potencial de manera lenta pero constante excepto los días 6 y 10 donde se presentaron disminuciones en ella, motivo por el cual en el día 10 la celda fue alimentada con una solución al 1 M de glucosa ya que esta es metabolizada rápidamente por los microorganismos (Sharma & Kundu 2010). Una vez alimentada la celda, se alcanzó un potencial máximo de 870 mV en el día 14 de operación. Posterior a esto se puede observar que el potencial se mantuvo alto alrededor de siete días y luego inició su descenso, el cual pudo ocurrir debido al rápido crecimiento del consorcio bacteriano que se mantuvo con pocas variaciones aproximadamente siete días, limitando la transferencia de sustrato hacia las bacterias presentes en la superficie del ánodo e impidiendo la transferencia de electrones entre los electrodos (Logan & Regan 2006).

Siendo el pH un parámetro importante en la celda se registró su valor con el fin de conocer un poco más a fondo lo que está sucediendo en el interior de la ella ya que éste mide los iones hidrógeno liberados por la película bacteriana en el ánodo hacia el cátodo. Por tanto a continuación se muestra en la figura 10 la variación del pH durante los 30 días de operación de la celda.

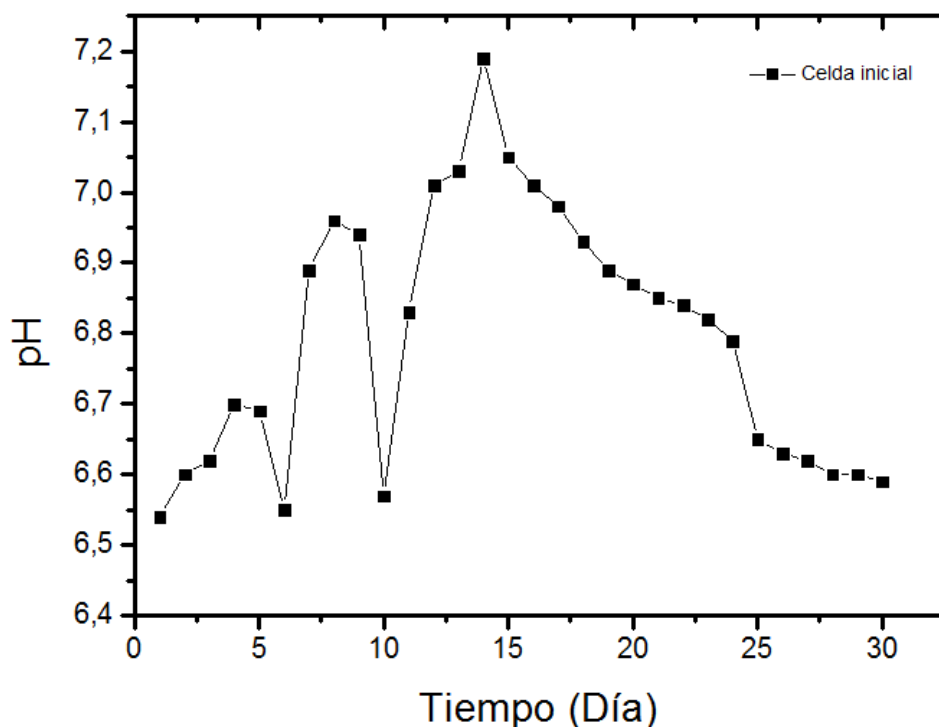


Figura 9. pH Vs Tiempo, celda inicial de 1 L.

Como se puede apreciar en la Figura 9 la celda inicia con una tendencia a volverse menos ácida, pero los días (6 y 10) en que la celda presentó caídas de potencial, se registraron valores bajos de pH, lo que puede indicar que hay una acumulación de iones H^+ debido al consumo de carga orgánica en la biopelícula bacteriana de los ánodos y que no están siendo asimilados por los cátodos. Sin embargo posterior a esto, en el día 10 la celda fue alimentada y el potencial en la misma llegó a su máximo el día 14 el cual coincide con un aumento en el pH que

puede ser debido a una liberación de carga más lenta en el ánodo y una asimilación más rápida y constante de ésta en el cátodo (Zhang et al. 2012).

Los valores de conductividad en la celda del día inicial, final y los días que se presentaron caídas y aumentos en el potencial de celda se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Conductividad en la CCM de 1 L.

<i>Día</i>	<i>Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)</i>	<i>Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)</i>
1	764	20
6	693	20,1
10	780	20
14	1490	21,5
22	1422	22,3
25	1120	22,4
30	900	22

La Tabla 2 muestra que la conductividad de la celda presentó una disminución entre el día 1 y el día 6 pero al no tener los datos de los otros días no se puede saber si entre los días 6 y 10 hubo un aumento y luego una disminución de la misma, pero siendo los datos del día 6 y 10 los más bajos obtenidos luego de que la celda fuera puesta en marcha al relacionarla con los datos de esos días mostrados en las figuras 8 y 9 se evidencian valores de potencial bajos y una disminución en el pH de la celda, lo que genera una lenta transferencia de electrones entre el ánodo y el cátodo de la misma, por una disminución en la actividad bacteriana (Huang et al. 2010). El día 14 que fue el día que mayor potencial de celda se obtuvo también fue el día que mayor conductividad se mostró entre los días en que ésta fue medida.

A continuación se presentan en la Figura 10 las curvas de polarización y de densidad de potencia del día en que la celda alcanzó su potencial máximo, es decir el día 14.

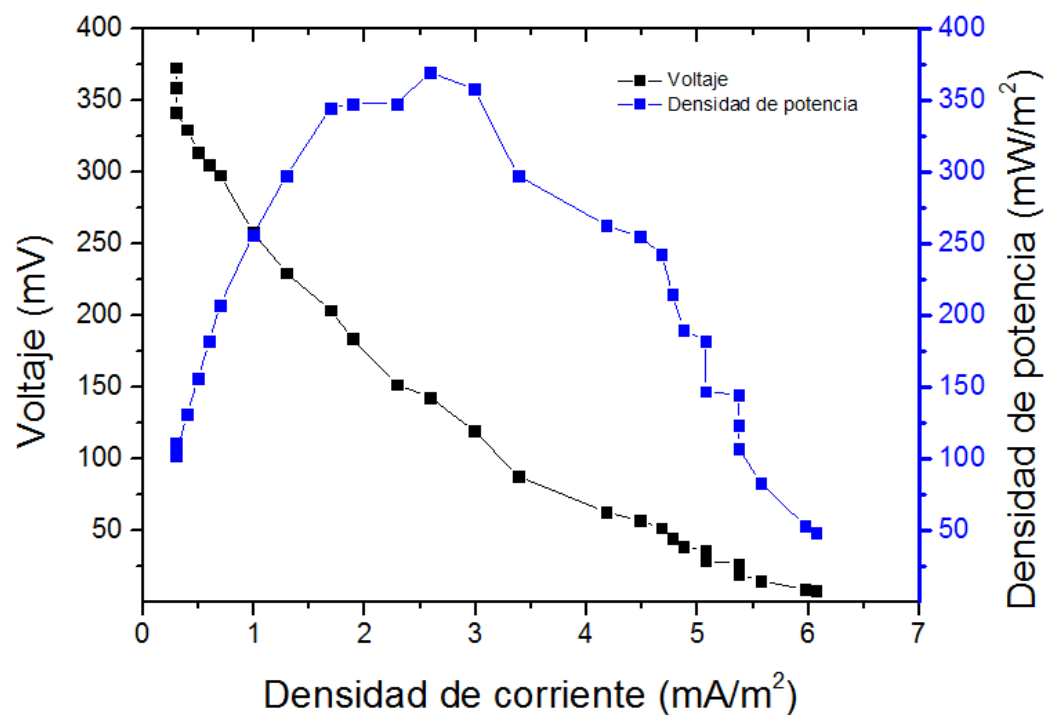


Figura 10. Curva de Potencial de celda vs j y Densidad de Potencia vs j . Celda de 1 L.

En las curvas de polarización por lo general se pueden distinguir tres regiones importantes que explican la caída del voltaje, las cuales son debidas a: i) pérdidas por activación, ii) pérdidas por transferencia de masa y iii) pérdidas por caída óhmica (Logan 2007).

En la Figura 10 se pueden evidenciar dos de las tres regiones características en las curvas de polarización, las cuales corresponden a una caída rápida de voltaje a baja densidad de corriente debida a la activación, ya que son pérdidas de energía en la iniciación de las reacciones de oxidación – reducción. Las pérdidas de voltaje debidas al metabolismo bacteriano son inevitables pero pueden

reducirse usando catalizadores mejorados en el cátodo o bacterias diferentes en el ánodo.

La siguiente región visible en la curva de polarización es la de una caída de voltaje casi lineal debida a la transferencia de masa que se da cuando el flujo de reactivos para el ánodo o el flujo de productos del mismo son insuficientes y por tanto limitan la velocidad de reacción generando un problema, pues la acumulación de protones bajará el pH local, afectando negativamente a la cinética bacteriana. Lo cual es coherente con los resultados obtenidos en las mediciones anteriores. Pues a pesar que éste día se registra el pH más alto de la celda, en general ésta tuvo una tendencia a un pH ácido.

4.1.1. Eficiencia de remoción.

Para analizar la eficiencia de la celda en cuanto al tratamiento del agua se realizaron pruebas de turbiedad, carbón orgánico total (COT) y demanda química de oxígeno (DQO) al iniciar y terminar el tratamiento. Los resultados se muestran en la Tabla 3. Cabe destacar que durante el tiempo de operación de la celda la temperatura se mantuvo en un rango entre 20 °C y 24 °C.

Tabla 3: Mediciones de Turbiedad, COT y DQO. CCM 1 L.

	<i>Turbiedad</i> (NTU)	<i>COT</i> (ppm)	<i>DQO</i> (mg/l)
<i>Inicial</i>	3697	30,04	159,959
<i>Final</i>	126	49,25	116,367

La Tabla 3 muestra que hubo una disminución en la turbiedad del agua aunque hubo un aumento de carbón orgánico total, lo cual se podría asociar con la

glucosa adicionada ya que ésta es transformada por las bacterias en ácidos volátiles, lactato, alcoholes, ácido acético, entre otros (Thurston et al. 1985), además que se podría decir que el pH ácido de la celda al iniciar su funcionamiento afectó el buen desempeño de las bacterias y posteriormente se volvió menos ácido debido a la poca actividad de éstas.



Figura 11. Turbiedad antes y después de 30 días. CCM 1L.

De acuerdo a los valores de DQO registrados se puede realizar un análisis de la eficiencia los cuales muestran una eficiencia de remoción de 27,25 %. Este bajo porcentaje puede deberse a la adición de glucosa ya que al ser un compuesto fácil de asimilar por los microorganismos estos obtendrían su energía de ella en lugar de metabolizar la materia orgánica presente en la celda.

4.2. Celda de 10 L.

Para la construcción de ésta celda se realizó un estudio de fuerzas en el programa de diseño SolidWorks con el objetivo de conocer la resistencia mecánica de éste y cuáles serían sus puntos débiles. Las propiedades y suposiciones implementadas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Propiedades y suposiciones de simulación.

Temperatura	298 K
Material	Acrílico
Límite elástico	3e+009 N/m ²
Coeficiente de dilatación térmica	5,2e-005/Kelvin
Tipo de análisis	Estático
Tipo de malla	Sólida
Número total de nodos	61443

Una vez corrido el programa se obtuvo el resultado de tensiones con una tensión de Von Mises máxima de 1,3 N/mm² (MPa). En la Figura 12 donde se puede apreciar que los vértices en la base de la celda serán los que mayor tensión recibirán por tanto el pegante que se use debe ser capaz de soportarla para asegurar que la celda no se abra. Motivo por el cual se decidió usar cloruro de metileno para fundir las piezas de la celda y usar silicona fría para sellar estas uniones y así garantizar que no se presenten fugas a través de ellas.

En cuanto a los desplazamientos o deformaciones que se pueden presentar debido a las fuerzas en el interior de la celda el resultado obtenido se muestra en la Figura 13 y permite ver que este desplazamiento o deformación será mayor en la parte superior de las paredes laterales de la celda, así que pensando en darle

un mayor soporte y estabilidad a la celda se diseñó una base en madera (Figura 6) que sostenga la estructura acrílica y que a su vez haga que ésta sea un poco más fácil de transportar.

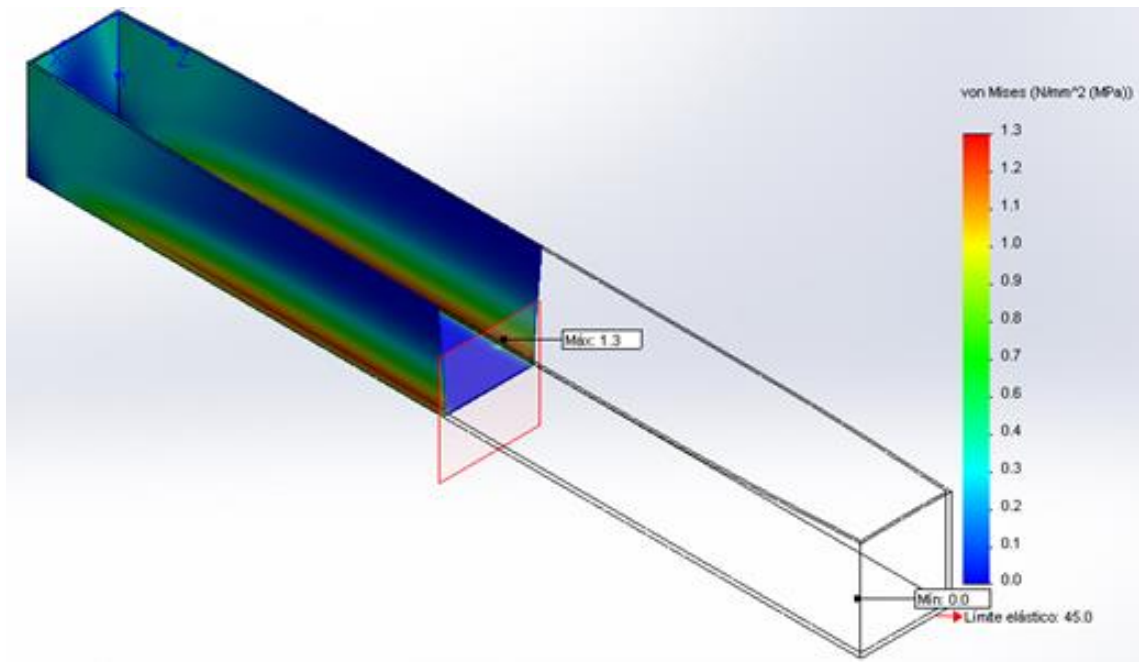


Figura 12. Tensiones en la celda.

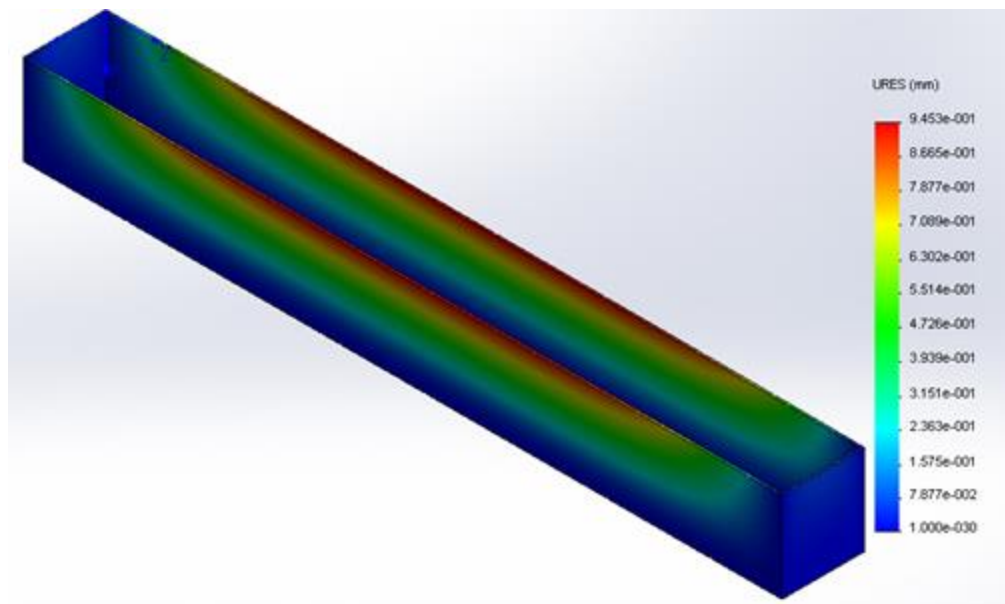


Figura 13. Desplazamiento o deformación.

En la figura 14 se puede apreciar la imagen de la celda construida finalmente.



Figura 14. CCM de 10 L.

Al momento de construir la celda no se pudo seguir la relación 1,5 cátodos /ánodos que se había utilizado en la celda inicial, pues para hacerlo se requerían 85 ánodos, los cuales por cuestiones económicas no se pudieron conseguir y la celda sólo trabajó con 33 ánodos.

4.2.1. Análisis electroquímicos.

Al igual que en la celda de 1 L ésta fue puesta a inocular durante una semana y posterior a éste tiempo se realizaron mediciones de corriente, voltaje y potencial individual en sus electrodos durante 30 días. Para las mediciones de corriente y voltaje se usaron resistencias externas entre 1,6 Ω y 3,6 M Ω .

Los valores de potencial de circuito abierto conseguidos en ésta celda se muestran graficados respecto al tiempo en la Figura 15.

La figura 15 muestra una inestabilidad en los potenciales de la celda y un crecimiento de éste a partir del día 14 que a diferencia con la celda de 1 L fue el día en que se alcanzó el potencial máximo. Transcurridos 18 días de operación en la celda, se llegó al potencial máximo que fue de 589 mV (valor más bajo que el registrado en la celda inicial de 1 L).

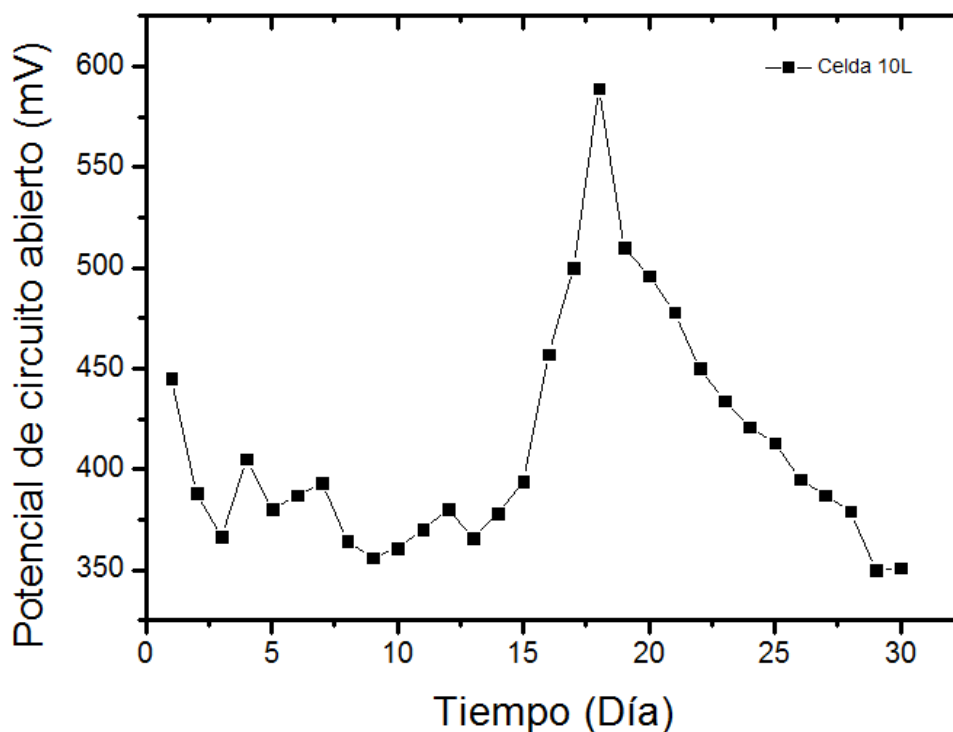


Figura 15. Potencial de circuito abierto, celda de 10 L.

Esto nos permite evidenciar que el consorcio bacteriano en el ánodo tuvo un crecimiento lento que puede deberse al tipo de carga orgánica presente en el lodo y al tamaño de la celda. Pero para poder conocer mejor el funcionamiento en la celda se midió el pH y la conductividad en ésta. Aunque por motivos de disponibilidad de equipo, en ésta celda no fue posible realizar dichas mediciones a lo largo de los 30 días, sólo al iniciar y finalizar la práctica en ella. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: pH, Conductividad y Temperatura. CCM 10 L.

	<i>Ph</i>	<i>Conductividad</i> ($\mu\text{S/cm}$)	<i>Temperatura</i> ($^{\circ}\text{C}$)
<i>Inicial</i>	7,44	1521	23
<i>Final</i>	7,64	422	24

En esta celda pese a no contar con los datos del resto de días se pudo observar que hubo una disminución significativa en la conductividad lo cual se podría deber al intercambio de protones y de otros cationes alcalinos (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , y Mg^{2+}) hacia el cátodo reduciendo el oxígeno y generando un incremento de pH. La disponibilidad de protones en el cátodo es un factor clave que determina la eficiencia de reducción del oxígeno, así que, un aumento del pH puede disminuir significativamente la generación de corriente de la CCM. Termodinámicamente, un cambio en una unidad de pH causa en el electrodo una pérdida de potencial de 59 mV (Revelo et al. 2013). Lo cual podría explicar la caída en el potencial de la celda después del día 18 de operación de la misma.

Para el día que presentó mayor potencial se construyeron las curvas de polarización y de densidad de corriente mostrados en la Figura 16. Mediante la cual se puede observar que la curva de polarización está compuesta por sólo dos regiones características siendo la región correspondiente a la transferencia de masa, la más acentuada. Explicando esto la dificultad que presentó la celda en estabilizarse al iniciar su funcionamiento ya que los protones liberados por el consorcio bacteriano son difícilmente transferidos al cátodo para realizar su reducción, dando como resultado unos niveles de generación de potencia bajos.

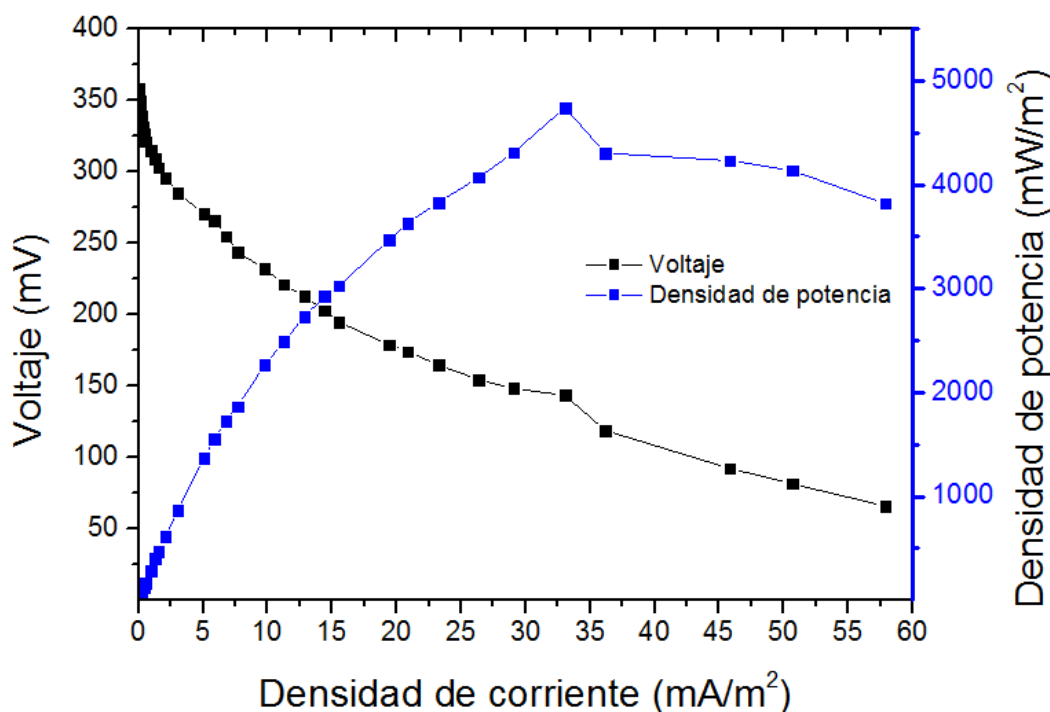


Figura 16. Curvas de Potencial de celda vs j y Densidad de corriente vs j . Celda de 10 L.

En la anterior figura se pudo ver un pico irregular en la curva de densidad de potencia, el cual corresponde al valor máximo alcanzado en la celda. Todas las mediciones fueron repetidas para corroborar los valores. Pero siguiendo la tendencia de los otros valores de la densidad de potencia es claro que ese dato es

irregular y genera desconfianza, por tanto se tomará 4309 mW/m² correspondiente al punto anterior al pico como el valor de mayor densidad de potencia alcanzado en la celda.

4.2.2. Análisis de remoción.

Con el fin de evidenciar la eficiencia alcanzada en el tratamiento del lodo se tomaron datos de turbiedad, carbón orgánico total (COT) y demanda química de oxígeno (DQO) al iniciar y finalizar la prueba. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6. Con base al DQO se calculó una eficiencia de remoción de 3,988%.

Tabla 6: Turbiedad, COT y DQO. CCM 10 L.

	<i>Turbiedad</i> (<i>NTU</i>)	<i>COT</i> (<i>ppm</i>)	<i>DQO</i> (<i>mg/l</i>)
<i>Inicial</i>	3465	15,09	47,190
<i>Final</i>	26,4	26,22	45,308

En la Tabla 6 se puede observar que en la muestra final de la CCM de 10 L se presentó un incremento de la carga de carbón orgánico total, lo cual puede indicar que no existe un único microorganismo emergente o "ganador" en las comunidades bacterianas que se desarrollan en el ánodo. Es probable que varias bacterias diferentes sean capaces de producir electricidad y debido a la gama de condiciones de funcionamiento, la arquitectura del sistema, los donantes de electrones y aceptores de electrones (en el cátodo). Además, una parte de la comunidad puede ser sostenida por metabolismos alternativos como la

fermentación y la metanogénesis utilizando aceptores terminales de electrones que no den lugar a la electricidad (Logan & Regan 2006).

En cuanto a la turbiedad hubo una disminución significativa en el color que se puede evidenciar en la Figura 17 la cual no está muy relacionada con la sedimentación de sólidos presentes ya que la prueba fue realizada al iniciar las mediciones de desempeño electroquímico de la celda, lo que quiere decir que la muestra inicial tomada del lago llevaba una semana en la celda. Llegando entonces a la conclusión que hubo una reducción significativa de los sólidos totales disueltos gracias a la acción de los microorganismos presentes en la celda.



Figura 17. Turbiedad antes y después de 30 días de tratamiento. CCM 10 L.

4.3. Análisis comparativo.

La densidad de potencia máxima alcanzada por la celda de 1 L fue de 370 mW/m^2 con un área superficial de ánodo de $0,01 \text{ m}^2$, lo que da una potencia de $3,7 \text{ mW}$;

tomando como base esa densidad de potencia y usando el área superficial de ánodo empleada en la celda de 10 L que fue de 0,041 m², esperaríamos obtener con ésta celda una potencia de 15,17 mW. Pero la densidad de potencia que se obtuvo con la celda de 10 L fue de 4309 mW/m² lo que da una potencia de 176,7 mW, casi unas 12 veces más de la potencia que se esperaba. Estos resultados podrían indicar que hubo una mejora significativa en el diseño de la celda, pero el diseño inicial no fue cambiado, entonces la diferencia entre estas celdas se encuentra en el lodo que se trató. Pues aunque el lodo fue tomado del lago ornamental de la Universidad del Valle sede Melendez, las muestras no fueron tomadas en la misma fecha y en las mediciones que se realizaron a la muestra antes de iniciar el tratamiento se pudo ver que en la celda de 10 L la carga susceptible a ser oxidada es 3,39 veces menor a la que se encontraba presente en la celda de 1 L antes de iniciar su funcionamiento, sin embargo fue en la celda de 10 L en la que se obtuvo un mejor resultado electrogénico y hay dos posibles razones que explican este comportamiento, primero, un incremento de los productos de fermentación que ocasionan una disminución del pH en el sistema, lo cual inhibe la actividad enzimática; segundo, algunos compuestos del sustrato orgánico son utilizados para el crecimiento bacteriano y no para la generación de electricidad (Sharma & Li 2010).

De acuerdo a los resultados de las curvas de potencial y densidad de corriente se ha podido evidenciar que el mayor problema en este tipo de celdas se presenta en el área anódica pues entre más grande es ésta más se le dificultará al consorcio bacteriano estabilizarse y la transferencia de electrones entre el ánodo y el cátodo será más lenta (Jeon et al. 2013). Esto explicaría porque en la celda inicial de 1 L se alcanzó un potencial de celda máximo en menor tiempo que en la celda de 10 L.

Recientemente se realizó la descontaminación de un lago de China usando una CCM como pre-tratamiento para su biorremediación, logrando que la materia orgánica soluble disminuyera significativamente y simultáneamente se generó una

densidad de potencia de 164 mW/m³. Se encontró que el principal sustrato utilizado por la CCM fueron las proteínas presentes en las aguas del lago (He et al. 2013). Aunque los datos de éste estudio no se pueden comparar porque las condiciones en las que se realizaron son diferentes, sirve de referente para ver los alcances que tiene esta tecnología. Por tanto en la tabla 7 se muestran algunos trabajos que se han realizado y las densidades de potencia que se han logrado en ellos.

Tabla 7: Densidad de potencia máxima alcanzados en diferentes tipos de CCM.

Características de la CCM	Bacterias y/o sustrato	Tipo de electrodo	Densidad de potencia (mW/m²)	Referencia
Cámara doble MIP Nafion 117	Lodo anaeróbico / Acetato	Papel carbón (ánodo), platino (cátodo)	7200	(Oh et al. 2004)
Cámara sencilla sin membrana	Mezcla de bacterias / acetato, aguas residuales	Fibra de carbono	6860	(Fan et al. 2008)
Cámara sencilla con cátodo aireado	Agua residual industrial	Barras de grafito de 5 mm de diámetro (biocátodos)	15,3	(Lasso Silva & Olaya Ortiz 2013)
Cámara sencilla de cátodo expuesto, MIP	Agua residual doméstica (pozo séptico de la Vorágine)	Tejido de carbón con ánodos preparados con	15,37	(Ibáñez Redín 2013)

<i>nañion 117</i>		vulcan modificado con etilenglicol		
<i>Cámara sencilla de cátodo expuesto</i>	Lodo lago ornamental Univalle	Barras de grafito de 5 mm con platino en el cátodo	4309	Presente trabajo

En la anterior tabla se puede apreciar el avance que se ha tenido en el desarrollo de las CCM en la Universidad del Valle poniéndola al nivel de los resultados obtenidos en otros países.

4.3.1. Futuro de las CCM en Colombia.

En cuanto a materia de energía Colombia presenta dentro de su territorio dos realidades muy diferentes: por un lado un Sistema Interconectado Nacional (SIN) compuesto por plantas de generación despachadas centralmente y redes de transmisión que llevan esta energía generada a una parte del territorio nacional, y por el otro las Zonas No Interconectadas (ZNI), caracterizadas por tener una baja densidad de población, encontrarse en sitios alejados, de difícil acceso y generalmente con reservas y parques naturales en sus territorios así como comunidades étnicas y afro. El SIN abarca el 34% del territorio nacional donde habita el 96% de la población, con una cobertura de 96% diferenciada en áreas urbanas con 99% y áreas rurales con 83%. Sin embargo, existen departamentos como Guajira con cobertura rural de 45% y Vichada no interconectado con cobertura rural de 25% (ICEE-UPME 2012).

Históricamente el servicio de energía en las zonas no interconectadas (ZNI) se ha prestado mediante generadores diesel con un alto costo por el transporte del diesel y mantenimiento de los generadores y en muchos casos es de mala calidad. Muchas de las poblaciones no interconectadas no cuentan con un servicio disponible 24 horas, existiendo incluso municipios con servicio de 4 horas al día.

En estas zonas por lo general no es viable, ni ambiental ni financieramente, la expansión del SIN para llevar el servicio de electricidad dada la dispersión de su población, presencia de población vulnerable y de escasa capacidad de pago, así como la ubicación en zonas protegidas y de gran importancia ambiental. Es por esto que la estrategia de energización en estas zonas ha ampliado el enfoque de solo llevar energía eléctrica a desarrollar esquemas integrales, que incluyan una actividad productiva asociada al uso de la energía con el fin de generar un valor agregado a las comunidades y garantizar la sostenibilidad de los esquemas desarrollados.

Por otra parte en 2012, los hogares colombianos que cuentan con “inodoro conectado a alcantarillado”, como principal servicio sanitario alcanzaron 74,5% en el total nacional y 91,7% en cabeceras. Para el resto, el porcentaje de “hogares con inodoro conectado a pozo séptico” es del 55,8% y los “hogares sin servicio sanitario” a nivel nacional es del 4,1% conformado por un 1,0% en cabeceras y un 15,2% en el resto del territorio nacional (Bustamante R 2013).

En estas zonas, con un enfoque mayoritariamente social es muy probable que muchas de las tecnologías renovables representen una solución viable a los problemas de falta de acceso a la electricidad y de alcantarillado para el tratamiento de las aguas residuales. Y es aquí donde las CCM representan una gran alternativa. El diseño propuesto en éste estudio podría ser útil al implementar varias celdas en series para tener una mayor capacidad de lodos a tratar e incrementar la potencia generada. Esta tecnología puede ser usada como una etapa de pre-tratamiento a la cual se le puede acoplar un sistema de baterías para

almacenar la energía que se genere y usarla para suplir algunas necesidades básicas como iluminación en la planta de tratamiento.

Actualmente al sur occidente de Cali, en el corregimiento de la Buitrera, habitan aproximadamente un total de 6.615 personas y la PTAR de dicho corregimiento recibe entre 6 y 9 L/seg lo que al día serían entre 518,4 m³ y 777,6 m³. Con base al diseño propuesto de CCM tenemos que al tratar 10 L de lodo se obtiene una densidad de potencia máxima de 4309 mW/m² con un área superficial de ánodo de 0,04147 m². Ahora, suponiendo que se utilizarían varias de estas celdas en serie para tratar 500 m³ del agua residual generada en la buitrera, tendríamos un área superficial de ánodo total de 2,07 m² con la cual se obtendría una potencia de 8934 mW que son alrededor de 9 W. Aunque la potencia generada no es mucha, esto es sólo una ilustración de un sistema que puede ser mejorado y utilizado como pre-tratamiento de las aguas residuales y a su vez un cogenerador de energía eléctrica que puede ser almacenada y utilizada como fuente de iluminación en las plantas de tratamiento.

5. CONCLUSIONES

- Las dificultades expuestas para alcanzar potencias más altas en menor tiempo están directamente relacionadas con el tipo de sustrato y las bacterias presentes en él. Se recomienda hacer un estudio microbiológico para identificar el tipo de bacterias presentes en el lago y así entender mejor el comportamiento de éstas.
- La celda de 10 L alcanzó un nivel de densidad de potencia aceptable (4309 mW/m^2), considerando la baja carga orgánica susceptible a ser degradada en el lodo que fue tratado. Lo que indica que en sustancias con una mayor carga orgánica como la de aguas residuales domésticas los resultados podrán ser mucho mejores.
- El diseño propuesto tiene la ventaja de ser más económico que otros sistemas de cátodo aireado, por no necesitar fuentes externas para lograr la oxigenación de los cátodos. Pero es un diseño poco recomendable a gran escala pues la distancia entre los electrodos es un factor primordial en su desempeño electrogénico y este sistema no permite tener distancias cortas entre ellos cuando se trabaja con volúmenes de celda grandes.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas, R.M. & Bartha, R., 1981. *Microbial ecology: fundamentals and applications*
- Bustamante R, J., 2013. Encuesta nacional de calidad de vida. *DANE*, pp.1–40.
- Castells, X.E. & Gracia, L.J. de, 2012. *El hidrogeno y las pilas de combustible: Tratamiento y valorización energética de residuos*, Ediciones Díaz de Santos.
- Cooney, M.J. et al., 1996. Physiologic studies with the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio desulfuricans*: evaluation for use in a biofuel cell. *Enzyme and microbial technology*, 18(5), pp.358–65
- Ebbing & Gammon, 2010. *Química general*, Cengage Learning Editores.
- Fan, Y., Sharbrough, E. & Liu, H., 2008. Quantification of the Internal Resistance Distribution of Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 42(21), pp.8101–8107.
- He, Y.-R. et al., 2013. Electricity generation from dissolved organic matter in polluted lake water using a microbial fuel cell (MFC). *Biochemical Engineering*, 71, pp.57 – 61.
- Huang, Y., He, Z. & Mansfeld, F., 2010. Performance of microbial fuel cells with and without Nafion solution as cathode binding agent. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, 79(2), pp.261–4.
- Ibáñez Redín, G.G., 2013. *Ánodos de celdas de combustible microbianas fabricados con carbón vulcan xc - 72R modificado*.
- ICEE-UPME, 2012. Índice de Cobertura Energía Eléctrica. Bogotá.
- Jeon, Y. et al., 2013. Construction and Operation of a Scaled-up Microbial Fuel Cell. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 34(1), pp.317–320.
- Kiely, P.D., Regan, J.M. & Logan, B.E., 2011. The electric picnic: synergistic requirements for exoelectrogenic microbial communities. *Current opinion in biotechnology*, 22(3), pp.378–85.
- Lasso Silva, C.A. & Olaya Ortiz, L.M., 2013. *Diseño, construcción y puesta en operación de una celda de combustible microbiana utilizando materiales no convencionales*.

- Liu, Z.J., Liu, S. & Su, Z., 2009. Study of operational performance and electrical response on mediator-less microbial fuel cells fed with carbon- and protein-rich substrates. *Biochemical Engineering Journal*, 45, pp.185 – 191.
- Logan, B.E., 2007. *Microbial Fuel Cells* Wiley-Inte., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Logan, B.E. & Regan, J.M., 2006. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in microbiology*, 14(12), pp.512–8.
- Lovley, D.R., 2011. Powering microbes with electricity: direct electron transfer from electrodes to microbes. *Environmental microbiology reports*, 3(1), pp.27–35.
- Lynch, J.M. & Poole, N.J., 1979. *Microbial ecology: a conceptual approach*. J. Lynch & N. Poole, eds., London: Blackwell Scientific Publications
- Mook, W.T., 2013. A review on the effect of bio-electrodes on denitrification and organic matter removal processes in bio-electrochemical systems. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, pp.1 – 13.
- Oh, S., Min, B. & Logan, B.E., 2004. Cathode Performance as a Factor in Electricity Generation in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 38(18), pp.4900–4904
- Pant, D. et al., 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101, pp.1533 – 1543.
- De Paula, A. & De Paula, J., 2007. *Atkins Química Física* 8a edición., Ed. Médica Panamericana.
- Potter, A.M.C., Character, B. & Sep, N., 1911. Electrical Effects Accompanying the Decomposition of Organic Compounds Published by: The Royal Society Electrical Effects accompanying the Decomposition of Organic. , 84(571), pp.260–276.
- Rabaey, K. & Verstraete, W., 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23, pp.291 – 298.
- Revelo, D.M., Hurtado, N.H. & Ruiz, J.O., 2013. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Información tecnológica*, 24(6), pp.7–8.

- Richter, H., 2008. Electricity generation by *Geobacter sulfurreducens* attached to gold electrodes. *Langmuir*, 24, pp.4376 – 4379.
- Rittmann, B.E., 2006. Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 24, pp.261 – 266.
- Roldán Pérez, G. & Ramírez Restrepo, J.J., 2008. *Fundamentos de limnología neotropical*, Universidad de Antioquia
- Sacco, N., Bonetto, M.C. & Cortón, E., Generación de Electricidad en una Celda de Combustible Microbiana Mediada Utilizando Micro-ánodos Descartables. , (1428), pp.388–392.
- Sharma, V. & Kundu, P.P., 2010. Biocatalysts in microbial fuel cells. *Enzyme and Microbial Technology*, 47(5), pp.179–188.
- Sharma, Y. & Li, B., 2010. Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), pp.3789–3797.
- Thurston, C.F. et al., 1985. Glucose Metabolism in a Microbial Fuel Cell. Stoichiometry of Product Formation in a Thionine-mediated *Proteus vulgaris* Fuel Cell and its Relation to Coulombic Yields. *Microbiology*, 131(6), pp.1393–1401.
- Zhang, G. et al., 2012. Efficient electricity generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell. *Water research*, 46(1), pp.43–52.