



CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
EN ELECTROQUÍMICA, S.C.

Análisis técnico – económico de la tecnología de
celdas de combustible microbianas para la producción
de energías alternas

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

*Maestro en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad de Ingeniería Ambiental*

PRESENTA

I.P. Nadya Gretel Farias



Santiago de Querétaro, Qro., México, Octubre 2016.



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos
Subdirectora de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de Grado de la alumna NADYA GRETEL FARIAS, una vez leída y revisada la Tesis “**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA TECNOLOGÍA DE CELDAS BIOELECTROQUIMICAS MICROBIANAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS ALTERNAS**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente el 13 del mes de octubre del año dos mil dieciséis.

Dr. Fabricio Espejel Ayala
Presidente

Dr. Julio Alcantar Flores
Secretario

M.A. Jorge Selim Asaff Arantibia
Vocal

M.C. Jesús Cardenas Mijangos
Suplente



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos
Subdirectora de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la alumna NADYA GRETEL FARIAS, una vez leída y revisada la Tesis **“ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA TECNOLOGÍA DE CELDAS BIOELECTROQUIMICAS MICROBIANAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS ALTERNAS”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente el 06 del mes de octubre del año dos mil dieciséis.

Dra. María Yolanda Reyes Vidal

Dra. Bibiana Cercado Quezada

M.A. Jorge Selim Asaff Arancibia



Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección:

Dra. María Yolanda Reyes Vidal

Agradecimientos

A la Dra. María Yolanda Reyes Vidal, por su confianza y paciencia en este periodo. Por los conocimientos transmitidos y su apoyo en todo momento. Por permitirme formar parte de su grupo de trabajo, especialmente por ser mi tutora de tesis.

A la Dra. Bibiana Cercado Quezada y al M.C Jorge Selim Asaff les agradezco por su paciencia, tiempo y apoyo a lo largo de mi tesis. Y por los conocimientos transmitidos.

Al Dr. Fabricio Espejel Ayala, al Dr. Julio Alcántar y al M.C Jesús Cárdenas Mijangos, por formar parte de mi jurado. Por tomarse el tiempo necesario en la revisión de este trabajo para la mejora del mismo.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. por su personal, instalaciones y oportunidad de realizar mi maestría.

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de este trabajo de tesis.

A mis compañeros y amigos, por todos los momentos que pasamos juntos, por el apoyo y las enseñanzas brindadas.

A Ariadna Luna Avendaño por ser una parte muy importante en mi vida, por toda la paciencia y apoyo recibido cuando parecía que me iba a rendir.

A la familia Luna Avendaño por su cariño sincero, por adoptarme como parte de su familia en todo este tiempo.

A mis hermanos y sobrinas por sacarme una sonrisa en esos momentos de necesidad y principalmente por demostrarme que la distancia no es excusa para seguir unidos.

Ya para despedirme quiero dedicar este trabajo especialmente a mis padres pilares fundamentales en mi vida, por su amor y apoyo incondicional, perfectamente mantenido a través del tiempo y la distancia. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos. Los amo.

Índice

RESUMEN	X
ABSTRACT	XII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 MARCO TEÓRICO	4
2.1 Sistemas bioelectroquímicos (SBE) y celda de combustible microbiana (CCM).....	4
2.1.1 Concepto.....	4
2.1.2 Fundamentos de la generación de energía en los SBE	7
2.1.3 Funcionamiento de la CCM.....	8
2.1.4 Desempeño de las CCM	9
2.1.5 Configuración de la CCM	11
2.1.6 Diseños disponibles para las celdas de combustible microbianas	23
2.1.7 Tamaños de las CCM	27
2.1.8 Aplicaciones de las CCM	27
2.2 Minería de datos	31
2.2.1 Técnicas utilizadas en minería de datos.	32
2.3 Análisis Taguchi	32
2.3.1 Arreglos ortogonales	33

2.3.2	Análisis de resultados	34
3	ESTADO DEL ARTE	36
4	JUSTIFICACIÓN.....	37
5	HIPÓTESIS	37
6	OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS	38
6.1	Objetivo general	38
6.2	Objetivos específicos.....	38
7	METODOLOGÍA.....	39
7.1	Recuperación de la información técnica.....	39
7.2	Análisis técnico.	39
7.2.1	Componentes	39
7.2.2	Tamaño	40
7.2.3	Configuración técnicamente viable	41
7.3	Análisis económico	41
7.3.1	Capital fijo	41
7.3.2	Costos fijos	43
7.3.3	Inversión total	45
7.3.4	Costo de operación anual.....	45

7.3.5	Valor presente neto (V.P.N)	45
7.3.6	Tasa interna de retorno (T.I.R)	46
7.3.7	Período de recuperación de capital (Payback)	47
8	RESULTADOS	48
8.1	Recolección de datos y análisis de bibliográfico	48
8.2	Análisis técnico	49
8.2.1	Componentes	49
8.2.2	Tamaño	56
8.2.3	Diseño	60
8.2.4	CCM Propuesta	63
8.3	Análisis Económico	64
8.3.1	Capital fijo	64
8.3.2	Inversión total	67
8.3.3	Costo de operación anual	67
8.4	Criterio de viabilidad económica	70
8.4.1	Cálculos de viabilidad	71
9	ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA LA CCM PROPUESTA	73
10	CONCLUSIONES	75

11	RECOMENDACIONES	76
12	BIBLIOGRAFÍA	77
13	ANEXOS	91
13.1	Anexo 1	92
13.2	Anexo 2	105

Índice de figuras

Figura 2-1 Sistemas bioelectroquímicos (SBE), modificado de Wang y Ren, 2013.....	5
Figura 2-2 Publicaciones de SBE en el periodo 2004-2015.....	7
Figura 2-3 Celda de combustible microbiana.....	9
Figura 2-4 Imágenes de materiales de electrodos: (A) Papel carbón; (B) Placa de grafito; (C) Tela de carbono; (D) Malla de carbono; (E) Grafito granular; (F) Carbón activado granular; (G) Filtro de carbono; (H) Carbón reticulado vítreo; (I) Cepillo de carbón; (J) Malla de acero inoxidable (Wei y col., 2011).	13
Figura 2-5 Imagen de una membrana intercambiadora de protones de material nafion 117 marca Dupont.	17
Figura 2-6 Clasificación de los diseños de CCM, modificado de Zhou y col., 2012.....	24
Figura 2-7 a) CCM cámara sencilla (Liu y Logan, 2004); b) CCM doble cámara (Logan y Murano, 2005); c) CCM multicámara (Shimoyama y col., 2008); d) CCM tubular (Liu y col., 2004); e) CCM placa plana (Min y Logan, 2004).	27
Figura 2-8 a) CCM macroescala (http://microbialfuelcell.org/); b) CCM mesoescala (Logan y col., 2007); c) CCM microescala (Chen y col., 2011 b).....	27
Figura 7-1 Estrategía experimental.	39

Índice de tablas

Tabla 2.1 Sistemas bioelectroquímicos.	5
Tabla 2.2 Tipos de arreglos ortogonales (Rao y col., 2008).....	34
Tabla 7.1 Estimación de costos de los factores típicos incluidos en el capital fijo (Coulson y Richardson 2005).....	43
Tabla 8.1 Matriz inicial de componentes identificadas para la configuración técnica teórica viable de CCM.....	53
Tabla 8.2 Matriz abreviada de componentes identificadas para la configuración técnica (teórica) viable de CCM, a macroescala.....	57
Tabla 8.3 Comparación de los valores de salida de DP, EC y remoción de DQO.....	57
Tabla 8.4 Factores para la estimación del costo de capital fijo de una CCM (Coulson y Richardson 2005).....	64
Tabla 8.5 Costo total de total de los principales elementos para una CCM.	65
Tabla 8.6 Costos indirectos para la instalación de una CCM.....	66
Tabla 8.7 Costos variables de instalación de una CCM	68
Tabla 8.8 Costos fijos de la CCM propuesta	68
Tabla 8.9 Costos indirectos de producción.....	69
Tabla 8.10 Resultados obtenidos para los flujos de efectivo.....	72

Resumen

El desarrollo del sector energético tiene importantes desafíos, entre los que destaca, la incorporación de fuentes renovables de energía usando diversas tecnologías. La investigación de estos sistemas incluye diferentes alternativas, entre ellas, la generación de energía a partir de biomasa. Así, los sistemas bioelectroquímicos son una tecnología representada por bioreactores electroquímicos catalizados por microorganismos para la generación de formas energéticas usando biomasa como sustrato. Una forma de estos sistemas con las celdas de combustible microbianas (CCM) para la producción de bioelectricidad. Sin embargo, los estudios para su escalamiento e incorporación comercial aún son mínimos.

El objetivo de este trabajo fue analizar la factibilidad técnica y económica de la tecnología de las celdas de combustible microbianas a macroescala para la generación de electricidad. Se usó minería de datos para la recuperación y análisis de la información, determinando que los principales componentes de la CCM son ánodo, cátodo, configuración de la celda, inóculo, membrana y sustrato. Posteriormente se realizó un análisis Taguchi para obtener el componente de mayor grado de afectación identificándose al sustrato en su nivel de agua residual. Se determinaron los componentes adecuados para el diseño de una CCM teóricamente factible de llevarse a implementación macroescala: volumen de celda mayor a 0.5 L, cámara sencilla, geometría tubular, ánodo y cátodo de placa de grafito y agua residual como sustrato.

Tomando como referencia la celda teóricamente factible se cotizaron y estimaron los costos para una celda de 100 L, obteniendo un egreso anual de \$ 383,016.23. En función de los resultados obtenidos se calcularon el valor presente neto y la tasa interna de retorno dando valores negativos, ya que el egreso anual supera ampliamente al ingreso anual. Estos resultados mostraron que el VPN y la TIR para una tasa de descuento del 4.25% son negativos. Así, la configuración de celda de combustible microbiana teórica obtenida es factible técnicamente pero no económicamente, si se usa como variable de salida la generación de electricidad. Se presentó como alternativa de uso de la tecnología de estudio, su incorporación en sistemas de tratamiento de aguas residuales por su buen desempeño para la

disminución de la demanda química de oxígeno, con valores de hasta 80%, siendo comparable con otros sistemas biológicos.

Abstract

Development of the energy sector has major challenges, including integration of renewable energy sources adopting diverse technologies. Investigation about this systems involve different alternatives, including energy generation from biomass. In this manner, bioelectrochemical systems are reactors catalyzed through microorganisms for generating energy forms using biomass as substrate. One type of these systems are microbial fuel cells (MFC) for bioelectricity production. However, studies for scaling and commercial viability are minimal.

The aim of this study was to analyze technical and economic feasibility of microbial fuel cells macroscale for generating electricity. Data mining was used for recovery and analysis of information, determining that main components of the MFC are anode, cathode, cell configuration, inoculum, membrane and substrate. Subsequently, a Taguchi analysis was performed to obtain the component with the greatest influence. This component was substrate considering level of residual water. Components necessary for design a MFC theoretically feasible at level macroscale were determined. These components were cell volume of 0.5 L, single chamber, tubular geometry, graphite anode, graphite cathode and wastewater as substrate.

Feasible and costs were estimated using the theoretical cell (100 L), obtaining an annual outflow of \$383,016.23. Net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) were calculated. This values were negative considering that annual expenditure far exceeds the annual income. These results showed that NVP and IRR for a discount rate of 4.25% are negative. Consequently, theoretical microbial fuel cell was technically feasible but not economically, if electricity generation is used as output variable. An alternative was presented for to incorporate microbial fuel cells into systems of wastewater treatment, considering the high performance of reducing chemical oxygen demand (values up to 80%), comparable with other biological process.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional, junto con sus necesidades energéticas y el avance industrial, está provocando el agotamiento de recursos fósiles e importantes problemas de contaminación como el efecto invernadero y la lluvia ácida. Estos eventos han despertado el interés de las comunidades científicas y tecnológicas para la búsqueda de nuevas fuentes de energías alternativas que permitan satisfacer estos problemas. Los ritmos de crecimiento de los referidos eventos sugieren la necesidad de una nueva revolución industrial a nivel mundial en la cual los recursos de energía sean económicos, accesibles y sustentables (Chu y Majumdar, 2012).

Una alternativa a esta problemática pueden ser los sistemas bioelectroquímicos (SBE) los cuales permiten generar energía y remover compuestos presentes en diversos sustratos. Entre las principales aplicaciones de estos sistemas se tienen la generación de bioenergéticos tales como electricidad, hidrógeno y metano; altos porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno relacionada con altos niveles de contaminación de aguas residuales y la síntesis de productos químicos de alto valor vía electrosíntesis microbiana (ElMekawy y col., 2015; Tremblay y Zhang, 2015).

Las celdas de combustible microbianas (CCM) forman parte de estos SBE. Las CCM pueden convertir directamente la energía química de un sustrato orgánico a energía eléctrica a través de una serie de reacciones redox. Esta tecnología de bioreactores innovadores puede utilizar un amplio rango de sustratos orgánicos solubles e insolubles presentes en desperdicios y aguas residuales, así como aquellos presentes en la biomasa renovable, ofreciendo beneficios duales de generación de energía renovable en forma de electricidad con simultánea remediación de residuos, finalmente considerados como procesos ecológicamente amigables (Logan y col., 2006; Cercado - Quezada y col., 2010; Tremblay y Zhang, 2015).

Las CCM utilizan el metabolismo microbiano de ciertas especies bacterianas para la generación de electrones. Estos electrones, resultado de la oxidación del sustrato, pueden ser

transferidos al ánodo mediante diversos mecanismos. Además, se producen protones que crean un potencial positivo en el cátodo, que junto al potencial negativo del ánodo, generan una diferencia de potencial que resulta en la producción de energía eléctrica (Logan y col., 2006).

El potencial tecnológico de las CCM es importante por ciertas ventajas, como son:

- ❖ La conversión directa de energía desde un sustrato.
- ❖ Funcionamiento del dispositivo a temperatura ambiente e incluso a bajas temperaturas o en regiones alejadas donde no es posible conectarse a los sistemas tradicionales de suministro de energía.
- ❖ No requiere tratamiento de gases debido a que los gases de salida están enriquecidos en CO₂ (de origen no fósil) y no tienen valor energético residual.
- ❖ Comparativamente con otras tecnologías de tratamiento de aguas tradicionales, como la digestión anaerobia, las CCM producen menor volumen de lodos lo que significa un ahorro en los costos de deshidratación que tienen estos materiales.
- ❖ Posibilidad de acoplarse a sistemas de diferentes requerimientos energéticos (Pant y col., 2012; Hernández-Fernández y col., 2015).

En los últimos diez años, a nivel mundial, el desarrollo exponencial de la investigación de los principales componentes de las CCM ha llevado a establecer nuevos retos tecnológicos, así como nuevas metodologías aplicadas para su análisis (modelado y simulación) que en conjunto permitan aumentar las densidades de potencia obtenidas (de 1 mW/m³ a 2.5 KW/m³). En este mismo sentido, es importante realizar el análisis técnico-económico del proceso que permita la recopilación, discusión y evaluación de diferentes variables críticas que afectan a la CCM. Además, el análisis debe permitir plantear la posibilidad de escalar los sistemas a nivel laboratorio, que van desde 10⁻⁶ hasta 10⁻³ m³, hasta una escala adecuada para el tratamiento de efluentes, por ejemplo, 1 a 10³ m³ para determinar la viabilidad del proyecto, inicialmente a escala piloto.

En general, este tipo de metodologías se dividen en dos etapas. La primera corresponde con el análisis técnico que consiste en un estudio del proceso a partir de la estimación de las posibles formas en que puede elaborarse el producto. Para realizar este tipo de análisis es fundamental elegir un modelo de diseño de experimentos que, a través de arreglos estadísticos, permita determinar los factores que influyen en la variable de interés y el nivel de influencia de los mismos (Wu y Wu, 1997). La metodología Taguchi es una de estas herramientas y se utiliza para optimizar procesos o productos. Esta consiste en analizar ciertas combinaciones de datos a partir de arreglos ortogonales preestablecidos y, a diferencia de otras metodologías, permite utilizar variables cualitativas en el análisis.

La segunda parte corresponde con el análisis económico y determina la inversión necesaria para la realización del proyecto y el costo operativo de la tecnología, así como otra serie de indicadores que servirán como base para la evaluación económica del proyecto (Domingo y Valero, 2005).

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas bioelectroquímicos (SBE) y celda de combustible microbiana (CCM).

2.1.1 Concepto

En 1911, Potter publicó: *“La desintegración de compuestos orgánicos por acción de microorganismos está acompañada por la liberación de energía eléctrica”*. En otras palabras, planteó la posibilidad de producir electricidad a través de los microorganismos. Sin embargo, la capacidad microbiana no se incorporó en un diseño de celda de combustible sino hasta 1960, creando la primera celda de combustible microbiana (Berk y Canfield, 1964). Desde entonces, el término celda de combustible microbiana se ha utilizado para referirse a un gran número de sistemas electroquímicos que producen electricidad utilizando microorganismos (Ieropoulos y col., 2005 b; Logan, 2008).

En los últimos años ha evolucionado el uso de microorganismos para cumplir funciones de transformación de energía y remoción de compuestos, permitiendo el desarrollo de los SBE (Tremblay y Zhang, 2015). Los SBE son un grupo de nuevas tecnologías que se basan en la capacidad de algunos microorganismos para catalizar una reacción de oxidación en el ánodo, o una de oxidación y/o reducción en el cátodo (El Mekawy y col., 2015). Dependiendo del modo de operación del reactor y del producto final que se forma, los SBE pueden clasificarse en tres grandes grupos (Figura 2-1): 1) Celdas de combustible microbiana (CCM); 2) Celdas de electrólisis microbiana (CEM) y 3) Celdas de desalinización microbiana (CDM) (Pant y col., 2012).

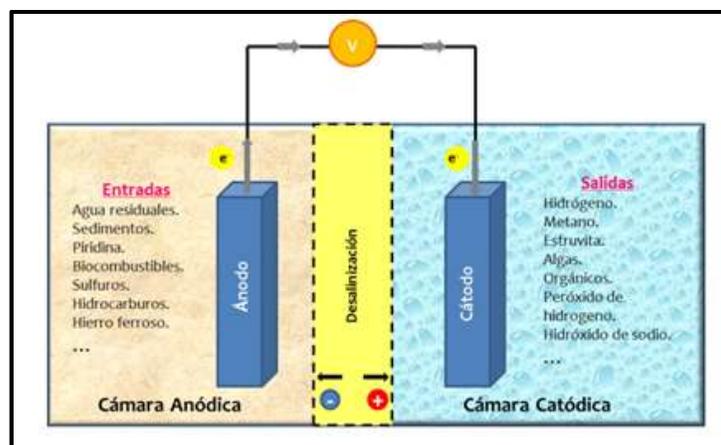


Figura 2-1 Sistemas bioelectroquímicos (SBE), modificado de Wang y Ren, 2013.

En la Tabla 2.1 se presentan los sistemas bioelectroquímicos reportados, sus funciones y comentarios.

Tabla 2.1 Sistemas bioelectroquímicos.

Nombre	Abreviatura	Función	Comentario	Referencias
Celda de combustible microbiana	CCM	Convertir el sustrato directamente a electricidad.	La oxidación de la materia orgánica tiene lugar en el ánodo y los electrones son conducidos al cátodo a través de un circuito externo.	Rabaey y Verstrate, 2005; Logan y col., 2006.
Celda de combustible microbiana sedimentaria	CCSM	Degradar sustrato o sedimentos presentes en el suelo, y obtener electricidad.	Es una CCM también es conocida como CCM bentónica.	Dominguez-Garay y col., 2013; Liu y col., 2015
Celdas de remediación microbiana	CRM	Remediar de contaminantes subterráneos.	Es una CCM. Utilizan los electrodos como aceptores (ánodo) o donantes (cátodo) de electrones.	Huang y col., 2011 b
Celdas solares microbianas	CSM	Integrar la reacción fotosintética con la producción de electricidad microbiana.	Es una CCM. Utiliza las relaciones sinérgicas entre la fotosíntesis y los organismos de las bacterias activas	Strik y col., 2011
Celda de electrólisis microbiana	CEM	Generar hidrógeno y/o reducir metales pesados añadiendo e. Eléctrica al sistema.	La producción de hidrógeno se lleva a cabo en el cátodo	Call y col., 2009; Rabaey y Rozendal, 2010

Sistema de electrosíntesis microbiana	SEM	Permitir los flujos metabólicos y seleccionar las reacciones de oxidación que se producen. Generar compuestos orgánicos solubles como el ión acetato.	Es una CEM. Permite la separación física entre el compartimiento que recibe la materia orgánica a tratar y el compartimiento en el cual se realiza la síntesis de las moléculas de interés.	Nevin y col., 2010
Celda de electrodiálisis inversa microbiana	CEIM	Generar hidrógeno sin la necesidad de añadir energía eléctrica al sistema.	Es una CEM. Incluye una pila de electrodiálisis inversa.	Nam y col., 2012
Celda de electrólisis microbiana de electrodiálisis inversa y producción química	CEMEIPQ	Producir ácido y bases. Capturar carbono y producir hidrógeno simultáneamente. Desalinizar.	Es una CEM que incluye una pila de electrodiálisis inversa.	Zhu y col., 2013 Zhu y col., 2014 Zhu y Logan, 2014
Celda de electrólisis microbiana para la producción de estruvita	CEMPE	Precipitar fosfato en el cátodo en forma de estruvita.	Es una CEM.	Cusik y Logan, 2012
Celda de metanogénesis microbiana	CCM	Favorecer la producción de metano desde el cátodo.	Es una CEM.	Luo y col., 2014
Celda de desalinización microbiana	CDM	Convertir un sustrato biodegradable directamente a electricidad y conducir la desalinización del agua.	Incluye cámaras adicionales entre el ánodo y el cátodo	Cao y col., 2009; Kim y col., 2011; Ismail e Ibrahim, 2015
Celda de desalinización y electrólisis microbiana	CDEM	Desalinizar agua.	Es una CDM. Utiliza la e. Generada por una CCM. Se componen de una cámara anódica, una cámara de desalinización y una cámara de catódica.	Chen y col., 2012 a, b
Celda de desalinización, electrólisis microbiana y producción química	CDEMPQ	Desalinizar agua y favorecer la producción química de algunos compuestos.	Es una CDM similar a la CDEM, pero incluye una membrana bipolar.	Chen y col., 2012 b

Los sistemas que utilizan enzimas que no son directamente producidas por la bacteria dentro de la celda son llamadas celdas de combustible enzimáticas (CCE) y no son consideradas SBE (Barton y col., 2004).

Las publicaciones de los SBE han aumentado exponencialmente en los últimos años. En la Figura 2-2 se observa la predominancia de publicaciones acerca de las CCM con respecto a otros SBE.

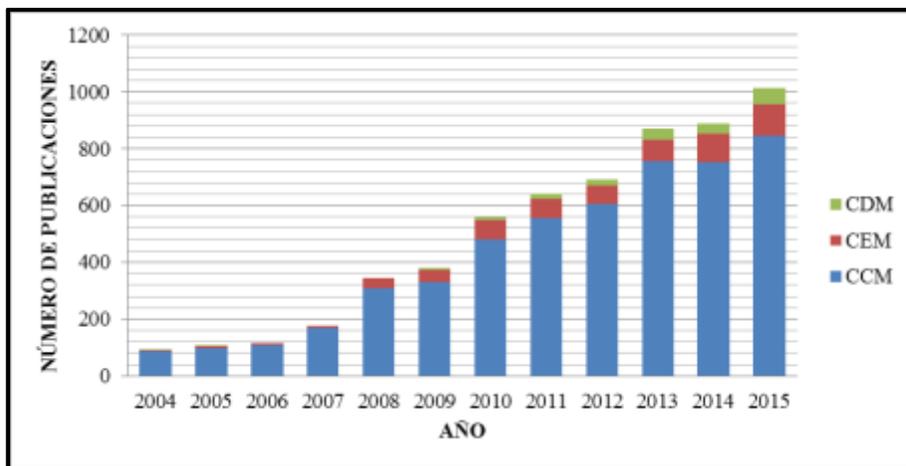


Figura 2-2 Publicaciones de SBE en el periodo 2004-2015.

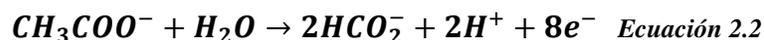
2.1.2 Fundamentos de la generación de energía en los SBE

La generación de energía en las CCM tiene su origen en la ecuación de la energía libre de Gibbs, que involucra la reacción que ocurre entre el donador y aceptor de electrones.

$$\Delta G = nF(E_{donador} - E_{aceptor}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

El trabajo máximo que se deriva de los dos procesos puede determinarse mediante esta expresión. Por lo tanto, la energía libre de Gibbs representa la máxima cantidad de trabajo útil que puede ser obtenida de una reacción.

Para considerar las reacciones producidas en el ánodo, se considera como ejemplo la oxidación del acetato:



Así, el potencial de equilibrio del ánodo se obtiene a partir de la ley de Nernst (Ortiz-Martínez y col., 2015).

$$E_{eq,a} = E^{\circ}_{eq,a} - \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$E^{\circ}_{eq,a}$ = Potencial al equilibrio estándar de la semireacción (V).

R = Constante de los gases ideales (8.31447 J mol⁻¹ K⁻¹).

T = Temperatura (K°).

n = Número de electrones intercambiados.

F = Constante de Faraday (95485 Coulomb mol⁻¹).

Q = Cociente de la concentración del compuesto en estado oxidado y la concentración en estado reducido.

El potencial al equilibrio del ánodo por la oxidación del acetato es:

$$E_a = E_a^0 - \frac{RT}{8F} \ln \left(\frac{[CH_3COO^-]}{[HCO_3^-]^2 [H^+]^9} \right) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Si el oxígeno es el aceptor de electrones en el cátodo entonces el potencial al equilibrio está dado por:

$$E_c = E_c^0 - \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{1}{pO_2 [H^+]^9} \right) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

2.1.3 Funcionamiento de la CCM

Una CCM típica está constituida por dos compartimentos, la cámara anódica y la cámara catódica, separados por una membrana de intercambio de protones (MIP) (Zhou y col., 2011). Los microorganismos en la cámara anódica oxidan al sustrato generando electrones, protones y CO₂ (Du y col., 2007). Los electrones son captados por el ánodo, que actúa como un aceptor de electrones artificial y se transportan al cátodo a través de un circuito externo.

Simultáneamente los protones migran hacia la cámara catódica a través de la MIP (Li y col., 2011) donde se combinan con el oxígeno del aire para reducirse a agua (Figura 2-3).

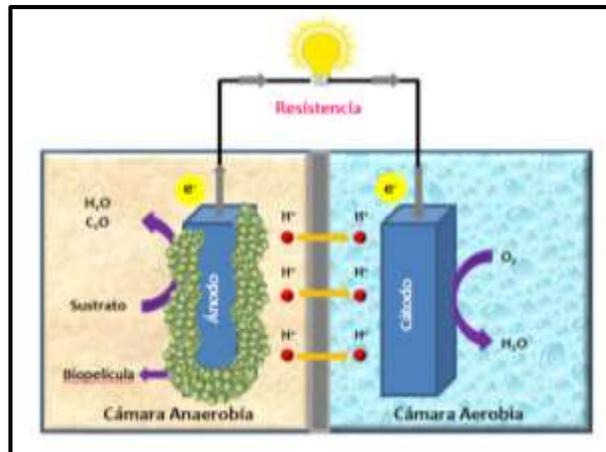


Figura 2-3 Celda de combustible microbiana.

2.1.4 Desempeño de las CCM

El desempeño de una CCM depende de diversas variables, las cuales son evaluadas partir del análisis de diferentes parámetros en los que se incluyen la densidad de potencia (DP) y la eficiencia coulombica (EC) (Chae y col., 2009).

2.1.4.1 Densidad de potencia

La densidad de potencia es la cantidad de energía generada por unidad de área del electrodo (Wang y col., 2010) o la potencia por unidad de volumen del sustrato (2), (Luo y col., 2010) y se calcula de la siguiente manera:

$$DP = \frac{V^2}{aR_{ext.}} = \frac{P}{a} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

DP= Densidad de potencia (W/m²).

V= Voltaje (V).

P= Potencia (W).

a= Área del electrodo (m²).

R_{ext.}= Resistencia externa (Ω).

2.1.4.2 Eficiencia coulombica y producción de energía

La eficiencia coulombica (EC) es la relación entre los electrones recuperados como corriente eléctrica y los electrones disponibles de la materia biodegradable presente en la alimentación de una celda de combustible microbiana (Logan y col., 2006).

$$EC(\%) = \frac{\text{Coulombios recuperados}}{\text{Coulombios totales en el sustrato consumido}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

La eliminación de los equivalentes reductores (electrones) de la cámara anódica es similar a la disminución de la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales (Fornero y col., 2010). Por lo tanto, el cálculo de la eficiencia coulombica para la oxidación del sustrato orgánico en la cámara anódica se realiza basándose en la cantidad de la demanda química de oxígeno (DQO) eliminada por el cultivo mixto en la cámara anódica y la corriente eléctrica generada. Para una mezcla de sustratos o para un agua residual, el total de coulombios obtenidos se determina integrando la corriente frente al tiempo, para obtener la eficiencia coulombica de una CCM en régimen batch (Logan, 2006).

$$EC = \frac{M_{O_2} \int_0^t I(t) dt}{F b_{O_2} v_{an} \Delta DQO} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

M_{O₂}= Peso molecular del oxígeno (32 g/mol).

$\int (I) dt$ = Coulombios reales generados en la operación de la CCM (C).

F= Constante de Faraday (96,485 C/mol e⁻).

t= Tiempo de reacción o ciclo de operación de la CCM (s).

b_{O₂}= Número de moles de electrones generados por mol de oxígeno (4 mol).

v_{an}= Volumen total de la cámara anódica (L).

ΔDQO= Cantidad de DQO eliminado durante el ciclo de operación de la CCM (mg/L).

2.1.5 Configuración de la CCM

2.1.5.1 Ánodo

La selección del material del ánodo es un factor importante en la CCM, ya que es significativo para determinar el grado de adhesión de los microorganismos y la eficiencia de la transferencia de electrones, originando el crecimiento de la biopelícula, que es fundamental en la generación de corriente (Kiran y Gaur, 2013). Se reportan electrodos anódicos como el platino, oro, acero inoxidable, carbonos (grafito, fieltro de grafito, papel carbón, tela de carbono, malla de carbono, carbono vítreo reticulado) (Logan y col., 2005; Zuo y col., 2006; Du y col., 2007; Richer y col., 2008; Mohan y col., 2008 b; Lu y col., 2009; Patil y col., 2009; Yuan y col., 2010) (Figura 2-4). Sin embargo, los materiales basados en carbono son los más reportados.

2.1.5.1.1 Ánodos de carbono

Los materiales de carbono son los más utilizados como material anódico debido a su alta conductividad, buena biocompatibilidad, gran estabilidad química y su costo relativamente bajo. En términos de configuración, los electrodos a base de carbono se pueden dividir en:

- ❖ Estructura plana: el papel carbón, las hojas o placas de grafito y la tela de carbono son los materiales más comunes como electrodo anódico en pruebas de laboratorio (Min y Logan, 2004; Sun y col., 2010). Los electrodos de grafito tienen una estructura compacta y una superficie relativamente lisa, lo cual facilita la medición cuantitativa de la biomasa por unidad de área de superficie. En comparación con el papel carbón, la tela de carbono es más flexible y mucho más porosa, lo que permite una mayor superficie para el crecimiento microbiano, pero su costo es elevado (Zhang y col., 2010). La malla de carbono tiene un bajo costo y densidad de potencia ligeramente superior en comparación a la tela y al papel carbón (Wang y col., 2009). Además, se han reportado materiales como hoja de grafito y la tela de carbón activado (Zhao y col., 2008).

- ❖ Estructura empacada: cada vez es más común el uso de ánodos empacados para aumentar la superficie de contacto entre los microorganismos y el electrodo (Rabaey y col., 2005; Aelterman y col., 2008; Di Lorenzo y col., 2010; Li y col., 2010). Por lo general a escala laboratorio son utilizadas barras de grafito, las cuales tienen como principal ventaja una mayor área superficial. Otra opción es llenar la cámara anódica con gránulos de un material conductor, como el grafito granular. Estos deben compactarse con el fin de conseguir una zona completamente conductora, aunque pueden existir zonas muertas para la captación de corriente (Rabaey y col., 2005; Wei y col., 2011). Una desventaja de los electrodos empacados es que las porosidades son bajas por lo que el potencial de obstrucción después del funcionamiento a largo plazo es un problema (Rabaey y col., 2009).
- ❖ Estructura de cepillo: el ánodo de cepillo de fibra de carbón es un electrodo ideal que logra mayor área superficial, cuenta con grandes porosidades y una captación de corriente eficiente. Las densidades de potencia obtenidas con este material son mayores que las registradas con papel carbono (Logan y col., 2007). Sin embargo, la unión de las fibras es un problema, ya que obstaculiza el acceso de las bacterias a las superficies de las mismas, así como la difusión de sustrato en el interior del cepillo (Logan, 2007).
- ❖ Filtros de carbono: tienen como ventaja una gran superficie de contacto, pero generan una gran resistencia (Kim y col., 2002) y al utilizarse con aguas residuales se obstruyen los poros con las partículas en suspensión (Aelterman y col., 2008).

2.1.5.1.2 Ánodos de metal

Los materiales metálicos son más conductores que los materiales de carbono, pero muchos se han descartado debido a su corrosividad. Los electrodos de acero inoxidable, platino y titanio, han sido más utilizados como electrodos anódicos metálicos en las CCM (Kiran y Gaur, 2013).

El platino es inigualable como material anódico pero debido a la acumulación de los productos de fermentación, este material es propenso a la intoxicación, lo cual puede conducir a la

pérdida de su actividad electrocatalítica. Esta desventaja, sumada al alto costo del platino, generó la búsqueda de nuevos composites de platino y polímeros conductores tal como la polianilina fluorada (PANI) dando como consecuencia una mejor estabilidad del material y una mejor densidad de corriente (Niessen y col., 2004).

Algunos materiales no corrosivos, tales como el acero inoxidable, no logran alcanzar densidades de potencia altas en comparación con los materiales de carbono, debido a que la superficie lisa de metales no facilita la adhesión de las bacterias. Los cepillos de grafito con alambres de titanio, se utilizan regularmente como colectores de corriente. Los electrodos de oro también se han utilizado en varios estudios (Crittenden y col., 2006; Richter y col., 2008). Se ha encontrado que *Geobacter sulfurreducens* podría crecer en los ánodos de oro, produciendo corrientes casi tan efectivas como en ánodos de grafito (Richter y col., 2008).

2.1.5.1.3 Tratamientos especiales en el ánodo

Para mejorar la producción de energía en los estudios de CCM existen modificaciones en el ánodo. Estos métodos de modificación incluyen (i) tratamientos superficiales con métodos físicos o químicos, (ii) la adición de recubrimientos altamente conductores o electroactivos y (iii) el uso de electrodos compuestos de metal y grafito (Wei y col., 2011).

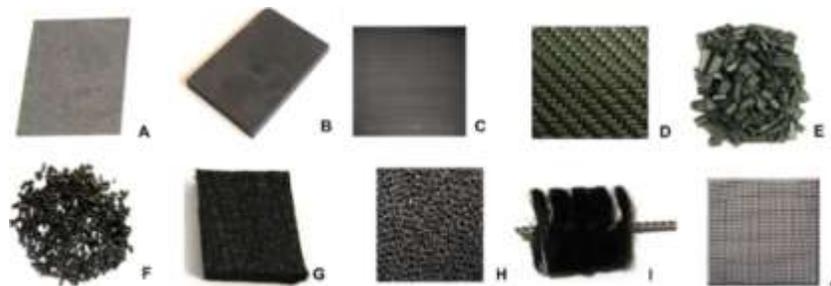


Figura 2-4 Imágenes de materiales de electrodos: (A) Papel carbón; (B) Placa de grafito; (C) Tela de carbono; (D) Malla de carbono; (E) Grafito granular; (F) Carbón activado granular; (G) Filtro de carbono; (H) Carbón reticulado vítreo; (I) Cepillo de carbón; (J) Malla de acero inoxidable (Wei y col., 2011).

2.1.5.2 Cátodo

La mayoría de los materiales utilizados como ánodo también se usan como materiales base de los electrodos catódicos. El oxígeno es el aceptor de electrones más utilizado debido a su alto potencial de oxidación, disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, la cinética de óxido-reducción es carente de oxígeno a pH neutro y bajas temperaturas (Yu y col., 2007) haciendo crítica la necesidad de un catalizador. Debido a que la concentración de los catalizadores y el área del electrodo afectan fuertemente la potencia de salida (Wei y col., 2011) se han investigado una amplia cantidad de catalizadores como: metales nobles, platino (Zhuang y col., 2012; Malaeb y col., 2013; Zhang y col., 2014); productos químicos líquidos, ferrocianuro (Oh y Logan, 2006; Patil y col., 2009 a; Zhang y col., 2009; Elakkiya y Matheswaran, 2013; Guo y col., 2013); o microorganismos para la obtención de biocátodos (Kiran y Gaur, 2013).

El uso de cátodos con carbono como único catalizador presenta una cinética muy lenta para la reducción de oxígeno, y sólo pueden ser utilizados en sistemas en los que la cinética anódica también sea lenta, de modo que la lentitud de la reducción de oxígeno en el cátodo no limite el sistema. Para aumentar la tasa de reducción del oxígeno se usa generalmente platino como catalizador en el cátodo (Logan y col., 2007; Wang y col., 2008; Ahn y Logan, 2010; Zhuang y col., 2012; Malaeb y col., 2013; Zhang y col., 2014). Como alternativa se proponen catalizadores de hierro (II) pirolizado, ftalocianina, porfirinas (Zhao y col., 2005), espinelas (Mahmoud y col., 2011) y perovskitas (Dong y col., 2013).

2.1.5.2.1 Cátodos aireados con catalizadores

Los cátodos aireados consisten en una capa de difusión (expuesta al aire), un material de soporte conductivo y una capa de catalizador/aglomerante (expuesta al agua). Los electrodos aireados están elaborados de materiales de soporte conductivos, tales como papel de carbono, tela de carbono y malla de platino, recubierto con una capa de catalizador/aglutinante (Logan y col., 2005; Yu y col., 2007; Scott y col., 2008 b).

Cuando se utiliza un catalizador sobre el cátodo, por lo general el catalizador se une al electrodo usando un polímero. El co-polímero de tetrafluoroetileno funcionalizado con grupos perfluorovinil éter sulfonato (nafion) y politetrafluoroetileno (PTFE) son los aglutinantes más utilizados en las CCM. El nafion produce una mayor densidad de potencia en comparación con PTFE; sin embargo, el nafion puede llegar a costar 500 veces más que el PTFE (Cheng y col., 2006 b).

En las CCM de una sola cámara es necesario recubrir el cátodo aireado con una capa de recubrimiento hidrofóbico (capa de difusión), para evitar los altos flujos de oxígeno desde el exterior hacia el interior del reactor, así como las pérdidas de agua a través del cátodo aireado (Cheng y col., 2006 a).

2.1.5.2.2 Cátodos aireados sin catalizadores

El precio del cátodo puede considerarse como un alto porcentaje del costo total de la CCM (Rozendal y col., 2008) ya que por lo general se utiliza platino. Muchos investigadores han estudiado la posibilidad de utilizar materiales de carbono en zonas específicas de alta reacción catódica para reducir el sobrepotencial en lugar de utilizar catalizadores. El grafito granular no necesita de un catalizador debido a sus nanoporos, este tipo de electrodos logran altas densidades de potencias (Freguia y col., 2007).

2.1.5.2.3 Biocátodos

En el biocátodo o cátodo microbiano, los microorganismos son utilizados como biocatalizadores para aceptar electrones a partir del cátodo y así reemplazar el uso de catalizadores químicos (Huang y col., 2011). Los biocátodos son de dos tipos: (1) biocátodos aerobios que usan oxígeno como oxidante y microorganismos que asisten la oxidación de compuestos metálicos de transición, tales como Mn (II) o Fe (II), para la transferencia de electrones al oxígeno; (2) biocátodos anaerobios que usan diferentes compuestos como aceptores terminales de electrones, tales como: NO_3^- (nitrato), SO_4^{2-} (sulfato), entre otros (Sharma y Kundu, 2010).

Las principales ventajas de estos biocátodos en comparación a los cátodos convencionales son un costo relativamente bajo, buena estabilidad, son auto-regenerativos y cuentan con múltiples funciones para el tratamiento de aguas residuales (Huang y col., 2011). Por lo tanto, se ha convertido en un tema de investigación emergente dentro del campo de las CCM. Actualmente, estos electrodos se componen principalmente de materiales a base de carbono tal como placa de grafito, fieltro de carbono, grafito granular, cepillo de fibra de grafito, así como malla de acero inoxidable (Dumas y col., 2008 b; Liang y col., 2009; Behera y col., 2010; Xie y col., 2011). La superficie del electrodo y la generación de la biopelícula son dos factores principales que afectan el rendimiento de los biocátodos (Huang y col., 2011). Las estructuras empacadas y en forma de cepillo son las más utilizadas debido a que proporcionan una mayor superficie de contacto (Wei y col., 2011).

2.1.5.3 Membrana intercambiadora de protones

Algunos diseños de CCM requieren la separación de la cámara anódica y la cámara catódica, a través de una membrana de intercambio de protones (MIP). Aquellas de material nafion 115 (Figura 2-5) o 117 (Dupont Co, USA) son las más populares debido a su alta selectividad en la transferencia de protones (Kiran y Gaur, 2013). No obstante, este tipo de membrana tiene problemas como fugas de oxígeno del cátodo al ánodo, pérdida de sustrato en el cátodo y el transporte de otros iones como ferricianuro (Chae y col., 2008).

Una alternativa al Nafion® es la membrana ultrex CMI - 7000 (Membranas Internacional Incorp., Glen Rock, NJ, USA) que tiene mejor relación costo-eficiencia que aquellas de Nafion®. Otra opción en el uso de membranas de intercambio aniónico (MIA) son las membranas bipolares (BPM), membranas de ultra centrifugación o membranas de intercambio de cationes con materiales menos costosos y más durables (Harnisch y col., 2008). Cabe destacar que el mercado de las membranas está en constante crecimiento y se requieren más estudios para evaluar los efectos de la membrana en el desempeño y durabilidad de la CCM a largo plazo (Rozenal y col., 2007).

Por otro lado, los separadores de tela fueron utilizados para remplazar a las membranas de las celdas (Fan y col., 2007). En general, los separadores incrementan la resistencia óhmica y reducen la energía en un área superficial debido a que el transporte de los protones en el cátodo es menor. Sin embargo, los separadores permiten que el espacio entre los electrodos sea menor mejorando la densidad de potencia, siempre y cuando el oxígeno no penetre en la cámara anódica.

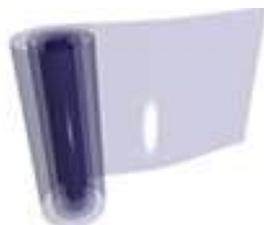


Figura 2-5 Imagen de una membrana intercambiadora de protones de material nafion 117 marca Dupont.

2.1.5.4 Inóculo

El mecanismo por el cual son liberados los electrones al electrodo en las CCM es uno de los principales objetivos de estudio para llegar a entender el funcionamiento de este tipo de dispositivos y mejorar su eficiencia (Rabaey y Verstraete, 2010). A altos potenciales anódicos, las bacterias pueden utilizar la cadena respiratoria en 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 ausencia de este potencial, ocurrirá la fermentación (Revelo y col., 2013).

La producción de una matriz polimérica compleja por acción de los microorganismos depositados en una superficie (biótica o abiótica) se le denomina biopelícula (Snider y col., 2012). La formación de dicha biopelícula sobre el electrodo mejora la producción de energía (Watanabe, 2008). El estudio del desarrollo y funcionamiento de la biopelícula en las CCM va en creciente desarrollo (Borole y col., 2011; Kumar y col., 2016). El conocimiento sobre las poblaciones microbianas que producen electricidad permitirá explorar nuevos métodos para la

generación de energía sustentable y renovable. Como inóculo para las CCM se pueden emplear cultivos de una especie microbiana o cultivos mixtos (consorcios).

2.1.5.4.1 Cultivos puros

Los géneros *Geobacter* y *Shewanella* son los más estudiados en cuanto al mecanismo de transferencia de electrones y su capacidad de oxidar completamente un compuesto orgánico para contribuir efectivamente a la producción de energía. Sin embargo, la diversidad de microorganismos usados es amplia, destacando por ejemplo, el empleo de arqueas y levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* en la cámara anódica (Rahimnejad y col., 2012).

2.1.5.4.2 Cultivos mixtos

Una opción ampliamente usada es el empleo de cultivos mixtos porque estos generan altos potenciales y su manejo es más económico y menos exigente. Para esta alternativa se utilizan lodos anaerobios y otras fuentes de comunidades microbianas (Du y col., 2007). En los consorcios anódicos, las bacterias más comunes pertenecen a los géneros *Shewanella*, *Geobacter* y *Pseudomonas*, destacándose las especies *S. putrefaciens*, *P. aeruginosa*, *G. sulfurreducens* y *G. metallireducens*. Diferentes estudios resaltan otras especies bacterianas que hacen transferencia directa o utilizan compuestos mediadores para las reacciones de óxido-reducción (Sharma y Kundu, 2010). De acuerdo con la literatura, los máximos valores de densidad de potencia han sido producidos con cultivos mixtos o con la especie *Geobacter sulfurreducens* (Yong y col., 2012).

2.1.5.4.3 Sustrato

El sustrato es considerado como uno de los factores más importantes de las CCM debido a que constituye el combustible a partir del cual se genera la energía (Liu y col., 2009). Una gran variedad de sustratos pueden ser utilizados en las CCM para la producción de electricidad, los cuales van desde compuestos puros o sustratos simples, tales como: acetato o butirato (Min y Logan, 2004), glucosa (Rabaey y col., 2003; Min y Logan, 2004), sacarosa (He y col., 2005), cisteína (Logan y col., 2005), glicerol (Chookaew y col., 2014), hasta sustratos complejos

como las aguas residuales domésticas (Min y Logan, 2004; Rodrigo y col., 2007), biomasa lignocelulósica (Catal y col., 2008; Huang y col., 2008 a, b), aguas residuales industriales (Digman y Kim, 2008; Wang y col., 2008 a, b; Katuri y col., 2012) y lodos (Xiao y Liu, 2013; Abourached y col., 2014). La participación del sustrato no se limita únicamente a la composición de la comunidad bacteriana en el ánodo (biopelícula), sino también al rendimiento del total de la celda, que incluye la densidad de potencia (DP) y la eficiencia de coulombica (EC).

Los factores considerados para seleccionar el sustrato a utilizar en la CCM son diversos, entre ellos resalta el costo de los mismos. Los sustratos puros resultan más costosos por las implicaciones de los procesos de obtención. En cambio, los sustratos complejos por lo general son productos de desecho industrial o doméstico disponibles en forma abundante, de fácil adquisición y por lo tanto económicos (Digman y Kim, 2008; Li y col., 2013). Otro factor que normalmente incide sobre la generación de energía es la concentración del sustrato. Esta dependencia es característica de las reacciones enzimáticas que ocurren en la CCM. Un incremento en la concentración del sustrato acelera la velocidad de reacción, lo que normalmente conduce a una mayor generación de energía; sin embargo, algunos autores han encontrado efectos contrarios y altas densidades de potencia a bajas concentraciones (Sharma y Li, 2010). 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 y Li, 2010).

Algunos de los sustratos más comunes y su influencia en el rendimiento en las CCM se discuten a continuación:

2.1.5.4.4 Sustratos simples

El acetato de sodio y la glucosa son los sustratos simples más reportados debido a su alto rendimiento en la producción de electricidad (Cheng y Logan, 2007) y sus altas eficiencias coulombicas de hasta el 98% (Rabaey y col., 2005 b).

- ❖ Acetato de sodio: la mayoría de los estudios reportados de CCM utilizan acetato de sodio como sustrato debido a la alta generación de electricidad que se produce al utilizarlo. El acetato es un sustrato simple y se utiliza ampliamente como fuente de carbono para bacterias electroactivas (Bond y col., 2002). Se utiliza acetato como sustrato, con el fin de evaluar nuevos componentes, diseños de reactores o nuevas condiciones operacionales, debido a su inactividad hacia los procesos microbianos (fermentación y metanogénesis) (Huang y col., 2010; Ieropoulos y col., 2010; Nam y col., 2010) y su uso a temperatura ambiente (Aelterman, 2006 a). Además, es el producto final de varias rutas metabólicas para fuentes de carbono de orden superior (Biffinger y col., 2008). En CCM de una sola cámara, se ha demostrado que la energía generada con acetato fue de hasta un 66% mayor que la producida con butirato (Liu y col., 2005). Chae y colaboradores (2009) compararon el desempeño de cuatro sustratos diferentes en cuanto a la EC y la potencia de salida. El acetato mostró la mayor EC (72,3%), seguido de butirato de metilo (43,0%), propionato de etilo (36,0%) y glucosa (15,0%).
- ❖ Glucosa: la glucosa es otro sustrato comúnmente utilizado en las CCM (Sharma y Li, 2010). La máxima densidad de potencia obtenida con glucosa, en una CCM modo batch fue de 216 W/m^3 (Rabaey y col., 2003). Se comparó glucosa y lodo anaerobio como fuentes de carbono, obteniendo valores de DP muchos mayores con glucosa (Hu, 2008). Sin embargo, el porcentaje de eficiencia coulombica alcanzada con glucosa es menor que con acetato (Lee y col., 2008), esto ocurre debido a que la glucosa es un sustrato fermentable, por lo que diversos microorganismos compiten por su consumo, y no es posible una alta producción de electricidad (Chae y col., 2009).

2.1.5.4.5 Sustratos complejos

El uso de sustratos complejos en una CCM es de gran interés debido a que, 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 de una comunidad microbiana diversa y electroquímicamente activa (Pant y col., 2010), cuyas poblaciones se van seleccionando dependiendo del tipo de sustrato. Algunos sustratos complejos son:

- ❖ La biomasa lignocelulósica: la abundancia de residuos agrícolas, posicionan a la biomasa como una prometedora fuente de carbono para la producción de energía (Huang y col., 2008 a, b). Sin embargo, la biomasa no puede ser transformada directamente por los microorganismos en la CCM, ya que es necesario convertirla a monosacáridos u otros compuestos de bajo peso molecular (Ren y col., 2007). Un estudio demostró que los monosacáridos generados directamente a partir de la hidrólisis de biomasa lignocelulósica son buenas fuentes para la generación de electricidad en CCM (Catal y col., 2008 a). Cuando se utiliza la celulosa como sustrato, la generación de electricidad requiere una comunidad microbiana con actividades tanto celulolíticas y exoelectrogénicas (Rezaei y col., 2009).
- ❖ Lixiviados de rellenos sanitarios: este tipo de sustrato es altamente contaminante debido a que contiene cuatro grandes grupos de contaminantes: materia orgánica disuelta, macro-componentes inorgánicos, metales pesados y compuestos orgánicos xenobióticos (Kjeldsen y col., 2002). El tratamiento de estos efluentes a partir de CCM se reportó por primera vez en 1991 por Habermann y Pommer, aunque no se mencionaron los valores de producción de energía. Otros estudios han demostraron la posibilidad de tratar lixiviados y generar electricidad a partir de celdas de combustible (Zhang y col., 2008; Ganesh y Jambeck, 2013; Li y col., 2013a).
- ❖ Agua residual definida: este sustrato es utilizado por varios grupos de investigación ya que cuenta con una composición definida y es fácil de controlar en términos de velocidad de carga, pH y conductividad. Venkata Mohan y col., (2008 a, b) utilizaron

aguas residuales preparadas a diferentes velocidades de carga en configuraciones similares de CCM para lograr resultados diferentes. Varios medios utilizados para el crecimiento microbiano contienen gran cantidad de mediadores redox, tales como cisteína y aguas residuales que contienen especies de azufre reducidos, los cuales pueden actuar como donadores de electrones abióticos y así aumentar la producción de energía por un corto tiempo (Aldrovandi y col., 2009) por lo tanto no representa el verdadero rendimiento del sistema.

- ❖ Aguas residuales de la industria alimenticia: este sustrato es considerado como sustrato ideal para la generación de electricidad debido a su rico contenido de materia orgánica, alta biodegradabilidad y abundante disponibilidad (Digman y Kim, 2008). Se han investigado una amplia variedad de aguas residuales provenientes de la industria de alimentos para la generación de electricidad a partir de CCM, incluyendo efluentes residuales de cervecería (Wang y col., 2008 a; Wen y col., 2009; Zhang y col., 2013) , productos lácteos (Cercado - Quezada y col., 2010; Nasirahmadi y Safekordi, 2011; Mardanpour y col., 2012; Kelly y He, 2014 b), verdura, procesamiento de carne - pescado (Katuri y col., 2012; Cheng y col., 2013; Li y col., 2013 a, b) y otras industrias de procesamiento de alimentos
- ❖ Aguas residuales de curtidurías: estos efluentes contienen alta resistencia de degradación, constituida principalmente por orgánicos biodegradables, grasas y proteínas (Katuri y col., 2012; Cheng y col., 2013). Sin embargo, una alternativa son las CCM, ya que se puede tratar el efluente y simultáneamente se puede generar una gran cantidad de energía (Katuri y col., 2012; Li y col., 2013 a, b).
- ❖ Aguas residuales de la industria cervecera: los sistemas de producción cerveceros producen gran cantidad de aguas residuales a partir de diferentes operaciones unitarias (sacarificación, fermentación, enfriamiento, lavado, etc.) las cuales pueden causar varios problemas ambientales. Este tipo de aguas residuales no son tóxicas, pero tienen altos valores de DBO en comparación con otras aguas residuales industriales (Wang y col., 2008 a, b). Su DQO se encuentra en un rango de 3,000 a 5,000 mg/L (Wang y col., 2008 a, b; Wen y col., 2009; Zhuang y col., 2012; Zhang y col., 2013 a, b). Por lo

que se han utilizado CCM para el tratamiento de estos efluentes (Wen y col., 2010; Zhuang y col., 2010).

- ❖ Aguas residuales de industria lácteas: la industria láctea incluye algunos de los procesos más contaminantes en términos del volumen de agua que se utiliza para la producción y su tratamiento (Vourch y col., 2008). Por lo general, son tratados por medio de la combinación de diversos enfoques biológicos y físico-químicos. En la última década se tiene un gran interés en el uso de CCM para tratar los desechos lácteos (Nasirahmadi y Safekordi, 2011; Mardanpour y col., 2012; Kelly y He, 2014 b). Por ejemplo, la eficiencia más significativa para el tratamiento de estas aguas se observó en una CCM de una cámara, removiendo hasta el 95% de DQO y obteniendo valores de densidad de potencia máxima de 1.1 W/m^3 (Venkata Mohan y col., 2010). La máxima densidad de potencia registrada usando este tipo de efluentes en CCM de doble cámara ha sido de $3,2 \text{ W/m}^3$ (Elakkiya y Matheswaran, 2013).

2.1.6 Diseños disponibles para las celdas de combustible microbianas

Existen diferentes configuraciones de CCM, la Figura 2-6 muestra la clasificación de estos reactores tomando en cuenta diferentes criterios.

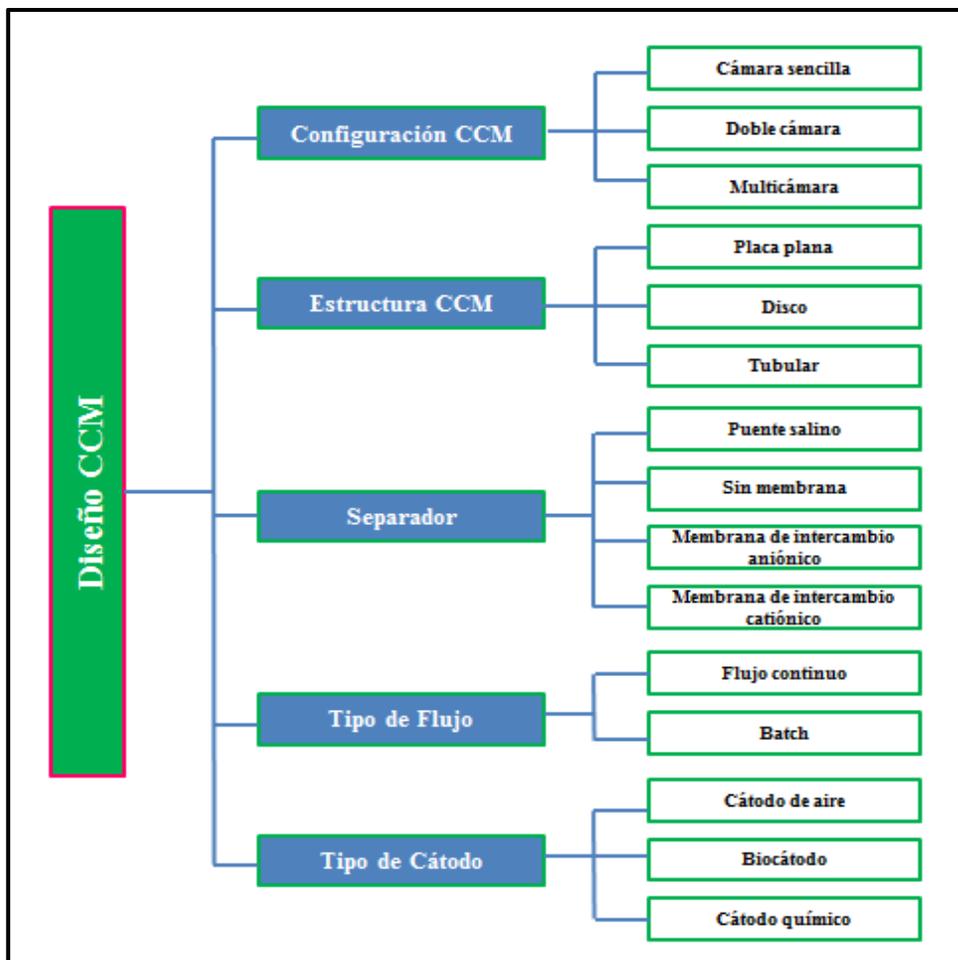


Figura 2-6 Clasificación de los diseños de CCM, modificado de Zhou y col., 2012.

2.1.6.1 Cámara Sencilla

Este diseño consta de un solo compartimento que incluye el ánodo y el cátodo, eliminando la necesidad de la cámara catódica mediante la exposición del cátodo directamente al aire (Figura 2-7 a). En esta configuración de CCM, los electrodos están separados por una MIP (membrana intercambiadora de protones), que suele ser prensada en caliente directamente sobre el cátodo, funcionando como un electrodo-membrana. El cátodo está expuesto directamente al aire; por lo tanto, no se necesita ventilación artificial. Liang y colaboradores (2007) reportaron que, si la distancia del ánodo y del cátodo es mínima, se reduce la resistencia óhmica interna, evitando el uso de catolito, necesario en las celdas de dos cámaras,

dando como resultado el aumento de la densidad de potencia. Este tipo de celdas ofrecen un diseño simple, rentable y produce energía de una manera más eficiente que las CCM de doble cámara (Du y col., 2007). También se han reportado CCM sin membrana (Liu y Logan 2004; Lorenzo y col., 2009; Venkata Mohan y col., 2010). Sin embargo, la contaminación microbiana del cátodo y la difusión del oxígeno del ánodo al cátodo son los principales inconvenientes. El diseño más común es el reactor de cubo y generalmente es fabricado de plástico plexiglás (Du y col., 2007).

2.1.6.2 Cámara Doble

Esta configuración de CCM es la más utilizada, consta de dos compartimentos, la cámara anódica y la cámara catódica separadas por una membrana de intercambio de protones, MIP, (Figura 2-7 b) (Borole y col., 2009; Alzate-Gaviria y col., 2010; Wang y col., 2010; Mansoorian y col., 2013) o por un puente salino (Kargi y col., 2007; Morris y col., 2009; Anupama y col., 2011). La cámara del ánodo se mantiene libre de oxígeno para producir el proceso de descomposición anaerobio y normalmente se purga con nitrógeno (Wang y col., 2010).

Las CCM de doble cámara tipo H son las más conocidas para experimentos de escala laboratorio, debido a su práctica configuración. Esta configuración se puede utilizar para estudiar parámetros básicos como el estudio de nuevos materiales o comunidades microbianas; sin embargo, produce bajas densidades de potencia debido a la alta resistencia interna (Zhuwei y col., 2007), causados por la zona reducida de la MIP y la distancia entre los electrodos. Se ha intentado aumentar las densidades de potencia en este tipo de celdas usando un aceptor de electrones en mayor concentración en la cámara catódica (Oh y Logan, 2006). A partir del uso de ferrocianuro se aumentó la densidad potencia en 1.5-1.8 mW/m² en comparación con el oxígeno, como aceptor en la cámara catódica (Oh y Logan, 2006).

CCM Multicámara

En este diseño se conectan entre sí varias CCM individuales en serie o en paralelo para alcanzar una alta salida de corriente (Figura 2-7 c). A esta combinación de varias CCM se le llama pila de combustible (Cheng y col., 2006). Debido a la mayor velocidad de reacción electroquímica, una conexión en paralelo puede generar más energía que una conexión en serie, cuando se opera en el mismo flujo volumétrico, pero es propensa a generar mayor cortocircuito en comparación con una conexión en serie (Aelterman y col., 2006). Además, se ha demostrado que una pila de CCM en serie tiene pérdida de tensión (Oh y Logan, 2007).

2.1.6.3 CCM Tubular

Este tipo de CCM ha demostrado ser la más eficaz en la operación de flujo continuo, además esta configuración de CCM es la más aplicable a escala comercial, ya que produce densidades de potencia elevadas y su costo es mínimo (Kim y col., 2010). Las CCM tubulares aumentan el tiempo de retención de lodos y disminuyen el tiempo de retención hidráulico, por lo cual se reducen costos de operación a largo plazo (Oh y col., 2010).

2.1.6.4 CCM Placa plana

Generalmente se define como una celda de combustible de hidrógeno convencional. Esta celda cuenta con una membrana de intercambio de protones, ubicada entre electrodos de papel de carbono (Figura 2-7 e). Los canales son perforados de modo que el flujo sigue un camino serpenteante a través del sistema. Debido a su baja resistencia óhmica las celdas de combustible de hidrogeno producen más potencia que una CCM. Sin embargo, se reportaron densidades de potencia inferiores con un reactor de cubo, con una separación entre electrodos más grande (Min y Logan, 2004). Esto indica que si existe una pequeña distancia entre los electrodos, la potencia no es la óptima.

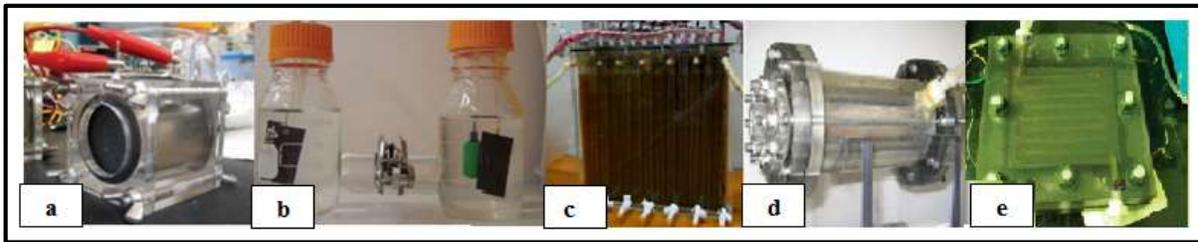


Figura 2-7 a) CCM cámara sencilla (Liu y Logan, 2004); b) CCM doble cámara (Logan y Murano, 2005); c) CCM multicámara (Shimoyama y col., 2008); d) CCM tubular (Liu y col., 2004); e) CCM placa plana (Min y Logan, 2004).

2.1.7 Tamaños de las CCM

Las CCM pueden clasificarse de acuerdo al volumen total (V_t), dividiéndose en tres grupos: macroescala, mesoescala y microescala (Ren y col., 2012).

- ❖ Macroescala: $V_t > 500$ ml.
- ❖ Mesoescala: $0.2 \text{ ml} > V_t < 500$ ml.
- ❖ Microescala: $V_t < 0.2$ ml.

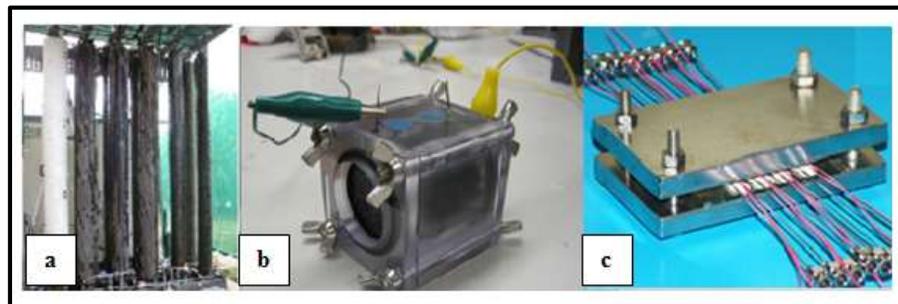


Figura 2-8 a) CCM macroescala (<http://microbialfuelcell.org/>); b) CCM mesoescala (Logan y col., 2007); c) CCM microescala (Chen y col., 2011 b).

2.1.8 Aplicaciones de las CCM

Las CCM se encuentran en un continuo proceso de investigación y desarrollo. Los reactores más grandes reportados a la fecha tienen un volumen interno del ánodo de 0.388 L (Liu y col., 2004 b). Sin embargo, la intensa investigación realizada por diversos grupos a nivel mundial

ha logrado grandes avances en el desarrollo de las CCM encontrando usos alternativos para esta tecnología que pueden aplicarse para solucionar problemas de gran importancia a nivel mundial. A continuación, se analizan algunas de las aplicaciones alternativas más importantes de las CCM.

2.1.8.1 Tratamiento de aguas residuales

En los últimos años, el tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales ha emergido como una tecnología potencialmente interesante por las dos tareas realizadas en forma simultánea: producción de energía y tratamiento de efluentes (Liu y col., 2004). El tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales está basado en el uso de microorganismos electroquímicamente activos. Este interesante tipo de microorganismos son capaces de transferir electrones extracelularmente a un electrodo mientras oxidan la materia orgánica presente en las aguas residuales. Los microorganismos funcionan como un catalizador para la oxidación electroquímica de la materia orgánica y el electrodo es descrito como un biánodo microbiano (Rozendal y col., 2008). El proceso de tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales puede ser modificado por una conexión eléctrica del biánodo a un electrodo auxiliar (cátodo) que desempeñará una reacción de reducción. Como resultado de esta conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo, las reacciones de los electrodos pueden ocurrir y los electrones pueden fluir del ánodo al cátodo produciendo así una corriente eléctrica (Logan y Regan, 2006).

Las aguas residuales provenientes de la industria, agricultura y domésticas contienen grandes cantidades de materia orgánica disuelta que requiere ser removida antes de ser descargada al medio ambiente (Gálvez y col., 2009; Patil y col., 2009). Actualmente existen procesos para remover los contaminantes orgánicos presentes en aguas de deshecho; sin embargo, la mayoría de estos procesos son tratamientos aerobios, los cuales consumen grandes cantidades de energía en el proceso de aeración (Feng y col., 2008).

Así, las CCM son una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, siendo sistemas que generan ahorros de energía de aireación y disposición de lodos (Xiao y col., 2012; Ren, 2013).

Para los sistemas de tratamientos tradicionales con lodos activados, la aireación puede representar entre un 45% - 75% de los costos de energía de la planta, por lo que la conversión de tanque de aireación a las unidades de CCM es benéfico, ya que no sólo elimina el consumo de energía para el sistema de aireación, sino que dependiendo de la configuración usada se puede producir entre un 10 - 20% más de energía, utilizable para otros procesos (Pant y col., 2010; Huggins y col., 2013). La máxima densidad de potencia reportada en celdas de combustible microbianas a escala laboratorio es 2.87 KW/m³, haciendo prometedora dicha tecnología (Fan y col., 2012). El reto es lograr el escalamiento del sistema (piloto o comercial) manteniendo al menos este valor de densidad de potencia.

Otra ventaja de las CCM es la baja producción de biomasa. Esta tecnología está basada en el rendimiento de bacterias electroquímicamente activas (0.07-0.16 gVSS /gDQO) la cual es mucho menor que el de los lodos activados (0,35-0,45 gVSS / gDQO), por lo que puede reducir la producción de lodos de 50 al 70 % (Fan y col., 2012). Estas reducciones pueden contribuir a disminuir el costo de operación de la planta desde 20% al 30%. Otros beneficios pueden incluir la remoción de nutrientes y la producción de productos de valor agregado, tales como soluciones cáusticas (Lin y col., 2015), H₂ (Cheng y col., 2009; Liu y col., 2010; Logan y col., 2008) y biogás (Chen y col., 2013).

2.1.8.2 Biosensores

Las CCM son estudiadas como biosensores de DBO (Zhang y col., 2011) y como una amplia variedad de biosensores (Su y col., 2011). También se han empleado para detectar compuestos químicos por ejemplo glucosa (Kumlangha y col., 2007) y acetato (Tront y col., 2008). Considerando su aplicación como biosensores, las CCM pueden ser útiles para entender y modelar respuestas de los ecosistemas obteniendo datos del medio ambiente (Logan y Regan, 2006). Otra aplicación importante en el campo de los biosensores es la detección de compuestos tóxicos, debido a que las bacterias muestran una baja actividad metabólica cuando son inhibidas por compuestos tóxicos (Dávila y col., 2011), dicho efecto causa una baja transferencia de electrones hacia el electrodo. Tomando en cuenta esta característica se puede construir un biosensor inmovilizando una bacteria en el electrodo de una CCM y

protegiéndola detrás de una membrana. Si un compuesto tóxico se difunde a través de la membrana, este puede ser medido por el cambio en el potencial del sensor. Dichos sensores pueden ser de utilidad como indicadores de sustancias tóxicas en ríos o en plantas de tratamiento de aguas (Chang y col., 2004).

2.1.8.3 CCM de sedimentos

Una CCM es capaz de producir electricidad a partir de la materia orgánica de los sedimentos acuáticos (Reimers y col., 2001). Estos sistemas están siendo estudiados para la alimentación de dispositivos electrónicos en lugares remotos, como sensores para la oceanografía o evaluación y control ambiental (DeLong y col., 2002). El ánodo se ubica en el sedimento anóxico marino, mientras que el cátodo se encuentra en el agua de mar, rica en oxígeno, eliminando la necesidad del uso de una PEM para la generación de electricidad. Además, la alta conductividad del agua permite un buen rendimiento de dicha tecnología (Lovley, 2006). Sin embargo, esta aplicación no tiene acceso a fuentes de energía convencionales y, por lo tanto, requiere reemplazar la batería periódicamente.

2.1.8.4 Biorremediación

Las bacterias no solo son capaces de donar electrones a un electrodo, sino también pueden aceptar electrones del mismo. Una modificación a las CCM convencionales, aplicándoles corriente, permite llevar a cabo reacciones específicas para remoción o degradación sin la producción de electricidad. La remediación puede incluir tanto, la degradación de contaminantes orgánicos en el ánodo, como la reducción de productos químicos inorgánicos en el cátodo (He y col., 2006). El tratamiento de contaminantes tales como hidrocarburos de petróleo (Morris y col., 2009), selenito (Catal y col., 2009), fenol (Luo y col., 2009), entre otros se lleva a cabo usando CCM. Diversas especies del género *Geobacter* han demostrado ser importantes en la degradación anaerobia de componentes del petróleo mediante la oxidación del contaminante o la reducción de Fe (III).

2.1.8.5 Generación de electricidad

Diversos estudios han demostrado que se puede obtener energía eléctrica a partir de compuestos orgánicos fermentables y no fermentables como glucosa, acetato de sodio, ácidos orgánicos, etc. Sin embargo, la potencia generada es baja para aplicaciones prácticas. Una alternativa es el almacenamiento de la energía eléctrica en dispositivos recargables como capacitores (Liang y col., 2011). Además, las CCM son adecuadas para la alimentación de pequeños sistemas de telemetría y sensores inalámbricos (Shantaram y col., 2005). En los últimos años, el desarrollo y optimización de la producción de electricidad de estos dispositivos, así como el número de aplicaciones prácticas se ha incrementado (Lovley, 2006).

2.2 Minería de datos

La minería de datos (MD) es una rama de la inteligencia artificial aplicada (Ha y col., 2000). Se define como el proceso que conjunta técnicas de aprendizaje automático, reconocimientos de patrones, estadística, base de datos y visualización, para dirigirla a la extracción e interpretación de grandes volúmenes de información (Kannan y Somasundaram, 2015).

El rápido crecimiento de las bases de datos crea una necesidad para desarrollar tecnologías que utilicen la información y el conocimiento de manera inteligente. Por lo tanto, la MD es una importante herramienta en diversas áreas de investigación (Liao y col., 2012). Esta metodología es utilizada en diferentes organizaciones como gobierno, instituciones científicas y empresas, para un sin fin de aplicaciones. Algunas de sus aplicaciones son filtrar registros de pasajeros de aerolíneas, datos de censos, datos del escáner de supermercados, entre otras (Romero y Ventura, 2010). En materia ambiental, la minería de datos se utiliza para determinar las condiciones de alto rendimiento en la producción de bioenergéticos (Alper y col., 2016; Sikorski y col., 2016), modelado y optimización de un sistema de bombeo de aguas residuales (Zhang y col., 2016).

2.2.1 Técnicas utilizadas en minería de datos.

Entre los principales métodos utilizados en se encuentran:

- ❖ Predicción: se basa en entrenar un modelo o método por medio de diferentes datos para poder predecir una variable partiendo de los mismos datos (Mohamed y Tasir, 2013).
- ❖ Clasificación: es utilizado para clasificar un elemento de datos en múltiples clases predefinidas (Kannan y Somasundaram, 2015).
- ❖ Modelos estadísticos: es una expresión simbólica en forma de igualdad o ecuación que se emplea en todos los diseños experimentales y en la regresión para indicar los diferentes factores que modifican la variable de respuesta (Kannan y Somasundaram, 2015).
- ❖ Agrupación: se agrupan datos dentro de un número de clases preestablecidas o no, partiendo de criterios de distancia o similitud, de manera que las clases sean similares entre sí y distintas con las otras clases. Su utilización ha proporcionado significativos resultados clasificadores o reconocedores de patrones, así como en el modelado de sistemas (Liao y col., 2012).

2.3 **Análisis Taguchi**

El objetivo principal de esta metodología es la optimización de productos y procesos, con el fin de asegurar productos robustos, de alta calidad y bajo costo (Dhavlikar y col., 2003). Este procedimiento consta de tres etapas:

- ❖ Diseño del sistema
- ❖ Diseño de parámetros
- ❖ Diseño de tolerancias

De estas tres etapas, la más importante es el diseño de parámetros cuyos objetivos son:

- ❖ Identificar qué factores afectan la característica de calidad en cuanto a magnitud y variabilidad.

- ❖ Definir los niveles óptimos en que debe fijarse cada parámetro o factor, a fin de optimizar la operación del producto y permitir que sea lo más robusto posible.
- ❖ Identificar factores que no afectan substancialmente la característica de calidad a fin de liberar el control de estos factores y ahorrar costos de pruebas.

Para lograr lo anterior se manejan una serie de herramientas estadísticas conocidas como diseño de experimentos a partir de arreglos ortogonales y las gráficas lineales (Rao y col., 2008). Aunque, la herramienta utilizada normalmente son diseños factoriales fraccionados, cuando el número de factores se ve incrementado, las posibles interacciones aumentan, así como las complicaciones para identificar cuáles son las condiciones específicas a experimentar (Chen y col., 2011 a).

2.3.1 Arreglos ortogonales

Un arreglo ortogonal se puede comparar con una replicación factorial fraccionada de manera que conserva el concepto de ortogonalidad y contrastes. Un experimento factorial fraccionado es también un arreglo ortogonal (Rao y col., 2008). Taguchi desarrolló una serie de arreglos particulares que denominó:

$$= L_a (b)^c \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

a=Representa el número de pruebas o condiciones experimentales que se evaluarán, que corresponde con el número de renglones o líneas en el arreglo.

b=Representa los diferentes niveles a los que se tomará cada factor.

c=Es el número de efectos independientes que se pueden analizar, esto es el número de columnas.

Tabla 2.2 Tipos de arreglos ortogonales (Rao y col., 2008).

Arreglo ortogonal	Números de renglones	Máximo de número de factores	Número máximo de columnas a estos niveles			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	7	5	-
L18	18	8	1	-	-	-
L25	25	6	-	13	-	6
L27	27	13	-	-	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	12	9	-
L36	36	23	11	13	-	-
L'36	36	16	3	-	-	-
L50	50	12	1		-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	62	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

2.3.2 Análisis de resultados

El análisis de resultados se puede efectuar de dos maneras diferentes (Camposeco-Negrete, 2013), mediante gráficas o por análisis de varianza. Cada forma de análisis tiene las siguientes características:

- ❖ Análisis por gráficas:
 - Se obtienen los promedios en cada nivel, para cada uno de los factores, incluyendo las columnas vacías.

- Se calcula la diferencia entre los promedios de niveles para cada factor, y se ordenan de mayor a menor en valor absoluto.
- Se realiza una gráfica evaluando el efecto de cada factor.

- ❖ Análisis de varianza (ANOVA): evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores (Mohapatra y col., 2009). Este análisis incluye los siguientes pasos:
 - Se obtienen los totales de la variable de respuesta o lecturas, para cada uno de los niveles de los factores.
 - Se calculan la suma de cuadrados.
 - Se construye una tabla ANOVA.
 - Se obtienen las conclusiones pertinentes a partir del error.

3 ESTADO DEL ARTE

La investigación y desarrollo a nivel mundial de las celdas de combustible microbianas (CCM) es impulsada en los últimos años en consecuencia de las necesidades energéticas. Diversos grupos de investigación direccionan sus trabajos en la generación de energía eléctrica a través de las CCM, ya que éstas a diferencia de las celdas de combustible convencionales pueden ser menos costosas para la producción de electricidad, debido a que no se precisa del uso de metales preciosos para lograr una operación eficiente, además que permiten condiciones de operación más sencillas, seguras y amigables con el medio ambiente (no existe una generación neta de gases de efecto invernadero a la atmósfera). Sin embargo, las aplicaciones industriales están aún limitadas por las bajas densidades de potencia de apenas unos cuantos miles de mW/m^2 (Franks y Nevin, 2010). El principal reto es llevar estas tecnologías fuera del laboratorio y diseñar sistemas prácticos para la producción de bioenergía a escalas mayores.

Los recientes avances en los nuevos microorganismos electroactivos, nuevos tipos de materiales para electrodos, una mejor comprensión del impacto de las membranas, el exhaustivo estudio de la biopelícula al igual que la utilización de diversos efluentes para la producción de energía y tratamiento de aguas residuales, además de la creciente cantidad de artículos reportados a escala piloto; son buenos indicadores de que la comercialización de la tecnología podría ser posible dentro de pocos años. A nivel internacional existe en Israel, la empresa Emefcy que señala entre sus productos una CCM (<http://www.emefcy.com>). Entonces para contribuir al desarrollo de dicha tecnología, de manera viable, es recomendable realizar un análisis técnico-económico utilizando la información bibliográfica disponible.

4 JUSTIFICACIÓN

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son una prometedora tecnología emergente, con menos de 15 años de desarrollo, que podrían contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que enfrenta la sociedad actual: reducir el uso de energía a partir de la quema de residuos fósiles y el tratamiento de aguas residuales (Babir, 2005). Los avances para el escalamiento de las CCM son escasos, debido a que generan una baja densidad de potencia, que aún no puede competir con los sistemas energéticos convencionales, haciendo que su implementación comercial aún sea incierta. A partir de la integración sistemática de la información disponible se realizará un análisis técnico-económico del proceso involucrado, que permitirá establecer su factibilidad y viabilidad.

5 HIPÓTESIS

Es técnica y económicamente factible utilizar celdas de combustible microbianas a macroescala, volumen de 500 ml a 100 l, para la producción de electricidad.

6 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

6.1 Objetivo general

Analizar la factibilidad técnica y económica de la tecnología de las celdas de combustible microbianas a macroescala, volumen de 500 ml a 100 l, para la generación de electricidad.

6.2 Objetivos específicos

1. Analizar la información bibliográfica disponible para obtener una configuración técnicamente factible de celda de combustible microbiana.
2. Estimar los indicadores económicos que permitan el estudio de viabilidad.
3. Evaluar la viabilidad de la celda de combustible microbiana en la escala propuesta.

7 METODOLOGÍA

A partir de los objetivos específicos se realizó la siguiente estrategia experimental para cumplir el objetivo general (Figura 7-1).

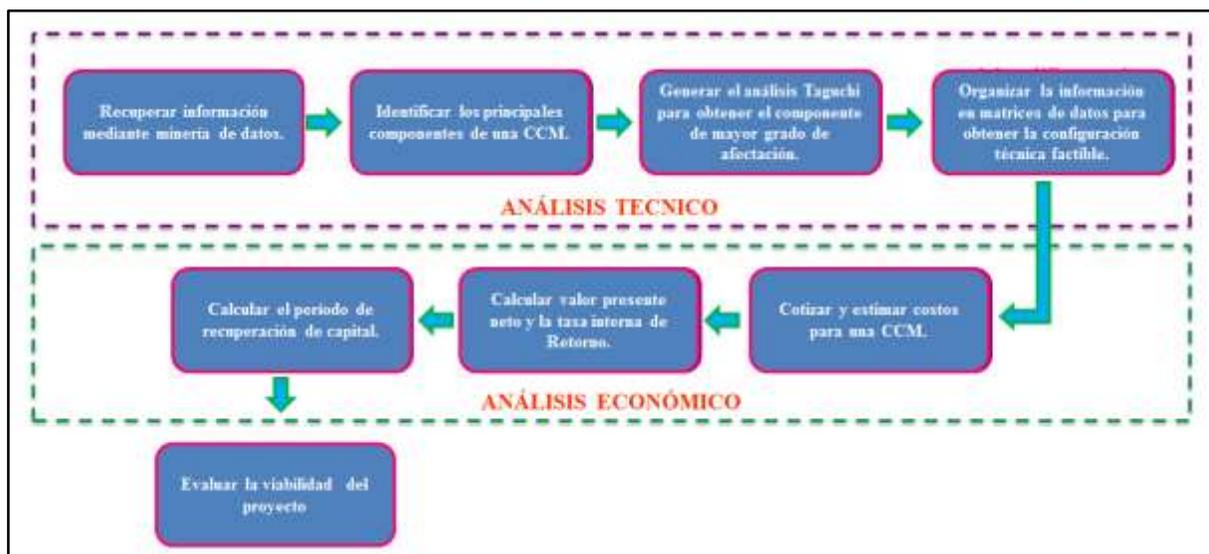


Figura 7-1 Estrategia experimental.

7.1 Recuperación de la información técnica

La información fue recolectada usando minería de datos, a partir de técnicas de agrupación y clasificación, incluyendo combinación de palabras clave y operadores booleanos en diferentes buscadores como Web of Science, Scopus, SciELO, Scifinder, entre otros. Esta recuperación de información fue necesaria para identificar los principales componentes de las CCM.

7.2 Análisis técnico.

7.2.1 Componentes

A partir de los seis componentes hallados mediante minería de datos, se analizó la información obtenida usando la metodología Taguchi (Minitab® 17, Statistical Software). Debido a que los factores contaban con una amplia cantidad de niveles fueron reducidos a subgrupos necesarios

para la creación de un arreglo ortogonal de seis factores a diferentes niveles de un arreglo ortogonal L_{16} , integrado por 3 factores (componentes) a 4 niveles (3×4) y 3 factores (componentes) a 2 niveles (3×2). Las variables de entrada que se utilizaron para alimentar el arreglo ortogonal fueron:

- ❖ 4 niveles:
 - Inóculo: Agua residual, lodo anaerobio, *Geobacter* y *Shewanella*.
 - Membrana: N/A, Nafion, CMI, Ultrex.
 - Sustrato: Agua residual, lodo anaerobio, polisacáridos, acetato.
- ❖ 2 niveles:
 - Diseño de la CCM: Sencilla, Doble.
 - Ánodo: Carbón, Grafito.
 - Cátodo: Carbón, Grafito.

La variable de salida considerada para este análisis fue la densidad de potencia (DP) en mW/m^2 , ya que el objetivo del trabajo incluye evaluar la cantidad de potencia generada en las CCM.

Mediante este tipo de análisis se puede evaluar el efecto de cada componente en sus diferentes niveles identificando con mayor grado de afección a aquellos que la línea obtenida tenga mayor longitud, o bien, menores valores de pendiente (Tiryaki y col., 2015). Las gráficas obtenidas aplicando análisis Taguchi pueden presentar líneas inclinadas y en algunos casos líneas horizontales que corresponden con las columnas vacías o error aleatorio (Wu y Wu; 1997).

7.2.2 Tamaño

De acuerdo con el enfoque del proyecto se consideró la clasificación de Ren y col. (2012):

- ❖ Macroescala: $V_t > 500 \text{ ml}$,
- ❖ Mesoescala: $0.2 \text{ ml} > V_t < 500 \text{ ml}$,
- ❖ Microescala: $V_t < 0.2 \text{ ml}$.

Tomando en cuenta únicamente celdas de combustible microbianas a macroescala, debido que este volumen de las celdas es el más susceptible de utilizarse comercialmente.

7.2.3 Configuración técnicamente viable

Mediante el análisis de minería de datos y Taguchi se seleccionaron los componentes de mayor importancia en los diseños de CCM, incluyendo volumen, régimen de flujo, parámetros físicos (pH, temperatura, resistencia externa), variables de salida (demanda química de oxígeno removida, densidad de potencia, eficiencia coulombica). Estos componentes se consideran las variables de diseño que permitirán obtener una configuración óptima propuesta de la CCM.

7.3 **Análisis económico**

Tomando en cuenta la configuración óptima (teórica) de la CCM obtenida en el análisis técnico se realizó el análisis económico siguiendo la metodología propuesta por Coulson y Richardson (2005). En esta se consideran técnicas y aspectos actualizados por el sector industrial y de procesos característicos de la ingeniería química, con importante información del diseño de procesos y equipos industriales. Cabe mencionar que, debido a la naturaleza del proceso involucrado en las CCM, fueron seleccionados algunos de los más importantes indicadores económicos, que permitieron tener un panorama general de los costos asociados a la tecnología involucrada.

En este trabajo se consideraron como indicadores de rentabilidad económica al valor presente neto, tasa interna de retorno y periodo de recuperación de capital. Los cuales fueron calculados a través de la estimación del capital fijo, inversión total y costos de operaciones.

7.3.1 Capital fijo

El capital fijo es el costo total de la tecnología lista para la puesta en marcha, que incluye los siguientes costos:

- ❖ Diseño, supervisión de ingeniería y construcción.
- ❖ Todos los elementos de la CCM y su instalación.
- ❖ Todas las tuberías, instrumentación y sistemas de control.
- ❖ Los edificios y estructuras.
- ❖ Instalaciones auxiliares, tales como los servicios públicos, terrenos y obras de ingeniería civil.

El capital fijo se estimó para la implementación de la CCM, tomando como referencia el método propuesto por Coulson y Richardson (2005). Este análisis inició con el método factorial de estimación de capital fijo (Lang, 1948), que es una técnica utilizada frecuentemente para obtener un orden de magnitud en la estimación de inversiones y además, establece que el costo de una planta industrial puede obtenerse multiplicando el costo del equipo básico por un factor (Jelen y Black, 1983). La ecuación usada fue la siguiente:

$$C_f = f_L C_e$$

Donde:

C_f = Capital fijo

C_e = Costo total de los principales elementos: tanques de almacenamiento, recipientes de reacción, columnas, intercambiadores de calor, etc.,

f_L = el factor Lang que depende del tipo de proceso.

$f_L = 3.1$ Planta de procesamiento de sólidos

$f_L = 4.7$ Planta de procesamiento de fluidos

$f_L = 3.6$ Planta de procesamiento mixtos (líquidos-sólidos)

Para lograr una estimación más precisa, los costos del factor de Lang se pueden considerar individualmente. Estos valores típicos son datos históricos referenciales (Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Estimación de costos de los factores típicos incluidos en el capital fijo (Coulson y Richardson 2005).

Costos de equipo pesado	Fluido	Fluido-Sólido	Sólido
Equipo de montaje	0.4	0.45	0.5
Tubería (aislamiento y la pintura).	0.7	0.45	0.2
Instrumentación	0.2	0.15	0.1
Electricidad	0.1	0.1	0.1
Edificios, proceso	0.15	0.1	0.05
Servicios	0.5	0.45	0.25
Almacenamiento	0.15	0.2	0.25
Desarrollo del sitio	0.05	0.05	0.05
Edificios auxiliares	0.15	0.2	0.3
Costo de la planta física total	3.4	3.15	2.8

7.3.2 Costos fijos

Para este proyecto se consideraron como costos fijos a aquellos en los que el costo fijo total permanece constante mientras que el costo fijo unitario varía con la producción, según las siguientes consideraciones:

- ❖ **Mantenimiento:** este gasto es imprescindible para el mantenimiento de la instalación de una CCM. Los costos anuales de mantenimiento para plantas químicas son altos, para

estimar el costo anual de mantenimiento se tomó un 5% del costo de capital fijo como indican Coulson y Richardson (2005).

- ❖ Mano de obra: en este gasto se considera la mano de obra directamente involucrada con la ejecución del proceso y que sea necesaria para operar la CCM. Para este trabajo se consideró la contratación de un operador por turno capacitado para realizar las tareas de supervisión del correcto funcionamiento del proceso y evaluar la calidad de los productos (agua tratada, energía generada).
- ❖ Supervisión: este gasto corresponde con la gestión directamente asociada con el funcionamiento. No será necesaria la supervisión, ya que las operaciones involucradas en el proceso como en la evaluación son posibles de realizar por la misma persona.
- ❖ Gastos generales: en este apartado se incluyen los costos generales asociados con la operación de la CCM, no incluidas en otras secciones; por ejemplo, dirección general, seguridad, médico, comedor, personal de oficina, limpieza y seguridad. El costo se suele estimar como un 50 a 100% de los costos de mano de obra; dependiendo del tamaño y si esta se instala en sitio nuevo o como una extensión de un sitio existente (Coulson y Richardson, 2005). Debido a que la CCM se situará como extensión de una empresa instalada se tomará el porcentaje más bajo.
- ❖ Laboratorio: el costo anual de análisis de laboratorio es de gran importancia para el control del proceso y de calidad en las plantas químicas modernas. Por lo general los costos se calculan como el 30% de la mano de obra (Coulson y Richardson, 2005).
- ❖ Depreciación: el capital se recupera por lo general como un cargo por depreciación, lo que da como resultado una suma determinada a pagar cada año para amortizar el costo de la planta. Comúnmente se considera una tasa fija durante la vida útil de la planta a "despreciar". Por lo general la vida útil de una planta química es de 10 años, lo que da una tasa de depreciación del 10 % al año (Happle y Jordan 1975; Holland y col., 1983; Valle-Riestra 1983).
- ❖ Seguro: la prima del seguro anual se paga a las compañías de seguros para prevenir pérdidas desastrosas.; por lo general es alrededor del 1 al 2% del capital fijo.

- ❖ Impuestos: este término se aplica a los impuestos locales, que se calculan sobre el valor total de la empresa, por lo que para la CCM no será necesario su cálculo.
- ❖ Regalías: si el proceso utilizado no ha sido desarrollado exclusivamente por la empresa operadora, es posible que de deban pagar regalías y derechos. No aplica en este caso.

7.3.3 Inversión total

La inversión total requerida para la implementación de la configuración de CCM propuesta se realizó a través de la estimación del capital fijo y los costos individuales de los principales elementos. Este valor se obtiene considerando el capital fijo más el capital de trabajo (5% capital fijo) para solventar gastos imprevistos. El capital de trabajo es la inversión adicional necesaria, más allá del capital fijo, para iniciar la puesta en marcha del proceso.

7.3.4 Costo de operación anual

El costo estimado de operación anual de la CCM fue calculado tomando en cuenta los costos indirectos y directos de producción, los cuales contienen los costos fijos y variables necesarios para la operación de la misma.

La inversión total y el costo de operación anual son esenciales a la hora de evaluar la viabilidad del proyecto, a través de indicadores como la tasa interna de retorno y el valor presente neto.

7.3.5 Valor presente neto (V.P.N)

Es el método más conocido para la evaluación proyectos de inversión a largo plazo. Es un parámetro que indica la viabilidad de un proyecto basándose en la estimación de los flujos de caja que se prevé tener (Meza, 2011). El V.P.N se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V.P.N = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

V_t = Representa los flujos de caja en cada periodo t.

I_0 = Es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n= Es el número de períodos considerado.

k= Es la tasa de descuento.

El valor presente neto se calculó a través del flujo de efectivo, en un periodo de 15 años (Lobato y col., 2014), la inversión total y la tasa de interés, obtenida a través del TIIE (Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio). La TIIE es una tasa representativa de las operaciones de crédito entre bancos calculada por el Banco de México.

7.3.6 Tasa interna de retorno (T.I.R)

Es la tasa de interés que permite que el V.P.N se iguale a 0, es decir la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial (Velez, 2004). La T.I.R es la máxima tasa de interés a la que un inversionista estaría dispuesto para solicitar un préstamo sin perder dinero (Meza, 2011).

$$V.P.N = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

F_t = Es el flujo de caja en el periodo t.

I_0 = Es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n= Es el número de períodos considerado.

Se consideró la inversión inicial obtenida, el flujo de caja en un periodo de 15 años (Lobato col., 2014).

7.3.7 Período de recuperación de capital (Payback)

Es un método estático de valoración de inversiones y se define como el periodo de tiempo requerido para recuperar el capital inicial de una inversión (Coulson y Richardson, 2005).

$$Payback = \frac{I_0}{F}$$

I_0 = Es la inversión inicial del proyecto

F = Es el valor de los flujos de caja

Un período corto de recuperación de capital configura un retorno rápido de la inversión, y se reducen los riesgos de pérdidas, al asegurar el flujo positivo. A menudo se utiliza para juzgar pequeños proyectos de mejora en plantas en funcionamiento. Por lo general, se espera que este tipo de proyectos cuenten con un tiempo de amortización de 10 a 15 años (Coulson y Richardson, 2005).

Finalmente el plazo de recuperación de la inversión fue calculado a partir del flujo de efectivo y flujo acumulado. Si bien el periodo de recuperación del capital es sencillo de calcular, este método no toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo, es decir sólo mide cuánto demora recuperar la inversión. Si se utiliza en la comparación de varios flujos de caja, no se da importancia a la vida útil de los activos, ni tampoco el flujo de caja después del período de retorno (Coulson y Richardson, 2005).

8 RESULTADOS

8.1 Recolección de datos y análisis de bibliográfico

Se identificaron 2482 artículos en la búsqueda con los siguientes operadores booleanos y palabras claves (celda de combustible microbiana y densidad de potencia):

(TITLE-ABS-KEY (microbial fuel cell) AND PUBYEAR >2002) AND (((power density))) AND (EXCLUDE (PUBYEAR 2015)) AND (EXCLUDE (DOCTYPE, "cp") OR EXCLUDE (DOCTYPE, "re") OR EXCLUDE (DOCTYPE, "ch") OR EXCLUDE (DOCTYPE, "ip))

Este universo inicial de información fue organizado en dos periodos de tiempo, el primero de 2003 a 2011 y el segundo de 2012 a 2014, debido a la cantidad creciente de artículos publicados en el segundo periodo. El año de búsqueda inicial fue el 2003, a partir del cual se observó un desarrollo exponencial de las publicaciones que contienen como palabras clave “microbial fuel cell”. El punto intermedio se consideró al tener aproximadamente el 50% de las publicaciones. En el Gráfico 8.1 se observa el rápido crecimiento de las publicaciones conteniendo estas palabras clave, en tan solo dos años (2012 – 2014).

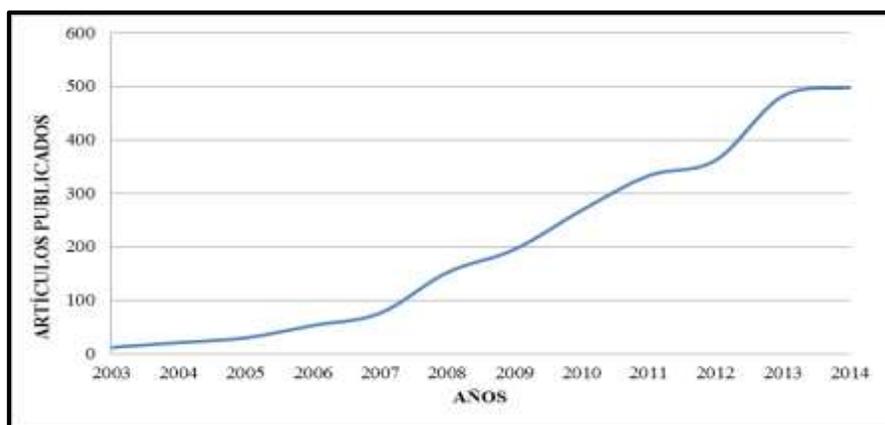


Gráfico 8.1 Cantidad de artículos publicados en Scopus utilizando las palabras clave “microbial fuel cell” y “power density” en el periodo 2003-2015.

Se lograron adquirir 856 de los 1140 artículos publicados en primer periodo (2003-2011). Posterior a la extracción de artículos fue necesario analizarlos obteniendo una lista con los

componentes reportados en cada publicación. Esta fue delimitada a los componentes que alcanzaban una moda mayor al 80% en los artículos publicados, identificando 6 componentes.

8.2 Análisis técnico

8.2.1 Componentes

Los componentes obtenidos coinciden con aquellos señalados por diversos autores especialistas en el tema (Logan y col., 2006; Duteanu y col., 2010; Kiran y Gaur, 2013; Gude y col., 2013; Revelo y col., 2013; Hernández-Fernández y col., 2015) estos son:

- ❖ Ánodo.
- ❖ Cátodo.
- ❖ Celda.
- ❖ Inóculo.
- ❖ Membrana.
- ❖ Sustrato.

Análisis del orden de afectación de los factores: se analizaron 856 artículos buscando como palabra claves los componentes identificados y la densidad de potencia en mW/m^2 , descartando las publicaciones que no tenían alguna palabra clave. En consecuencia de este análisis se hallaron 328 posibles configuraciones de diseños de CCM. Debido a la gran variedad de materias primas existentes para cada componente fue necesario homogenizarlas a través de características en común.

La información obtenida se analizó a través de la metodología Taguchi, dando como resultado el Gráfico 8.2. Los factores en sus diferentes niveles se presentan en el eje X, mientras que en el eje Y se muestra la media de las medias para cada componente. Según estos resultados, los componentes de las configuraciones analizadas que presentan afectación en el diseño de las CCM son: sustrato, configuración y cátodo, en orden decreciente. Para optimizar la variable de salida (densidad de potencia) se toman el nivel más alto, que corresponde con los puntos por

encima de la línea promedio global. Después de aplicar este análisis se obtiene que el sustrato en su nivel de agua residual es el factor que tiene el mayor grado de afectación.

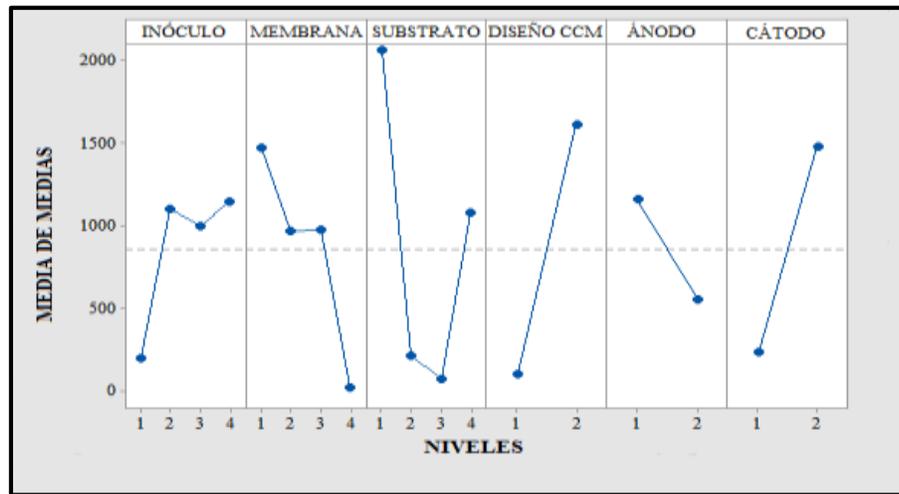


Gráfico 8.2 Nivel de afectación de las componentes a sus diferentes niveles en CCM.

Según las publicaciones de revisión del año 2005 a la fecha, donde se presentan los avances en investigación sobre CCM y en SBE, se señala que el sustrato es una de las variables ampliamente estudiada en estos sistemas. En estas revisiones se indica que el sustrato puede corresponder con aquellos efluentes de origen doméstico, industrial o agrícola y presentan altos valores de conversión a electricidad (Logan, 2005; Pant y col., 2010; ElMekawy y col., 2015). En estudios de escalamiento de CCM, la velocidad de conversión del sustrato determina variables de salida como eficiencia coulombica y densidad de potencia. En conjunto estos parámetros permiten la caracterización y evaluación del desempeño de las CCM. Entonces, el sustrato como factor de diseño puede representar un papel esencial en el escalamiento de las CCM (ElMekawy y col., 2014).

Para delimitar el estudio de las CCM usando como sustrato aguas residuales se generó un nuevo análisis de minería de datos, añadiendo como palabras clave de búsqueda “sustrato” y “agua residual”. Estos operadores excluyentes fueron aplicados al periodo 2003 – 2015. La combinación de búsqueda incluyendo los operadores booleanos fue:

(TITLE-ABS-KEY (microbial fuel cell) AND PUBYEAR >2002) AND (((power density))) AND ((substrate) AND (wastewater)) AND (EXCLUDE (PUBYEAR 2016)) AND (EXCLUDE (DOCTYPE, "cp")) OR EXCLUDE (DOCTYPE, "re") OR EXCLUDE (DOCTYPE, "ch") OR EXCLUDE (DOCTYPE, "ip"))

Con este análisis se identificaron 895 trabajos, recuperándose 88.3% de los mismos para obtener la información que permitiera delimitar la configuración técnica ideal teórica de CCM. La curva del número de artículos publicados bajo este segundo análisis de minería de datos siguió el mismo comportamiento de crecimiento exponencial en la cantidad de artículos publicados después del año 2005 (Gráfico 8.3).

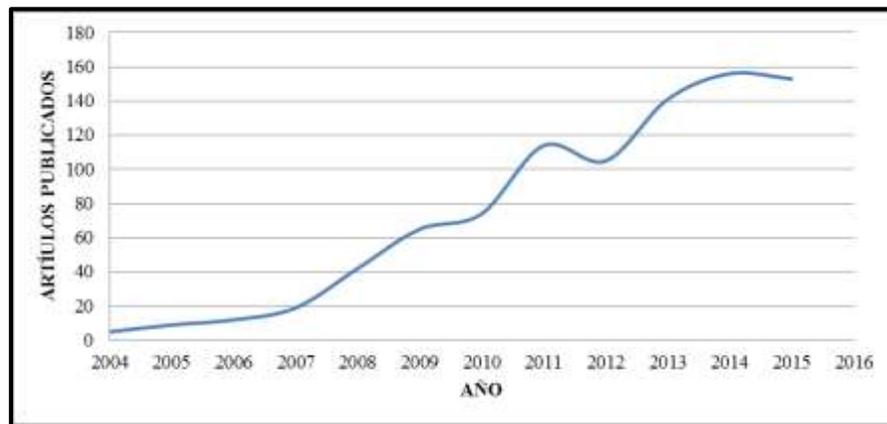


Gráfico 8.3 Cantidad de artículos publicados en Scopus utilizando los operadores (*microbial fuel cell and power density and substrate and waste water*) CCM periodo 2003-2015. Fuente: Scopus.

Para incrementar la calidad del análisis se aumentó de una a cuatro variables de salidas. Además de la densidad de potencia, la eficiencia coulombica es un factor indispensable a la hora de evaluar las CCM debido a que esta indica la eficiencia de la misma (Logan y col., 2006). Otra variable considerada fue el porcentaje de remoción de DQO, este factor viene ligado a la eficiencia coulombica (Fornero y col., 2010), además de que, al utilizar agua residual como sustrato, es posible la remoción de compuestos químicos para tratamiento de estos efluentes mientras se produce corriente. La última variable de salida que se agregó fue el volumen de trabajo de las CCM. Este parámetro se incluyó debido a que a cierto volumen de

trabajo las celdas de combustible microbianas se pueden considerar para escalamiento comercial (Ren y col., 2012).

Se revisaron los 805 artículos recuperados bajo este segundo análisis de datos para obtener una nueva matriz de datos compuesta de 6 variables de entrada (componentes identificados mediante el primer análisis de minería de datos) y 4 variables de salida (segundo análisis de minería de datos), distribuidas de la siguiente forma:

❖ Variables de entrada:

- Ánodo.
- Cátodo.
- Celda.
- Inóculo.
- Membrana.
- Sustrato.

❖ Variables de salida:

- Densidad de potencia.
- Eficiencia Coulómbica.
- Porcentaje de DQO removido.
- Volumen celda.

Después de analizar esta información se obtuvieron 145 configuraciones de celdas teóricas y técnicamente factibles, consideradas así pues se trata de configuraciones usadas en los artículos relacionados y sobre las que se tienen datos experimentales susceptibles de analizarse. (Tabla 8. 1, Anexo 1).

Tabla 8.1 Matriz inicial de componentes identificadas para la configuración técnica teórica viable de CCM.

1	CARACTERÍSTICA DE LA CCM	INÓCULO	SUSTRATO	ÁNODO	CÁTODO	MEMBRANA	VOLUMEN (m ³)	DP (mW/m ²)	EC (%)	COD (%)
2	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	N/A	388	9	12	70
3	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	28	28	28	55
4	CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	CARBONO CATALIZADOR PAPEL	N/A	28	146	20	75
5	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	MIP NAFION 117	22	72	14	42
6	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	MIP NAFION 117	22	49	63	79
7	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBONO CATALIZADOR PLATINO	MIP NAFION 117	250	38	47	-
8	CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	CARBONO TETRAFLUOROE TILENO CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	124.8	28	60
9	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO TETRAFLUOROE TILENO CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	560	55	66
10	CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	28	528	59	76
11	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	FILTRO DE CARBONO	FILTRO DE CARBONO	N/A	110	6.5	6.09	90.9
12	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	FILTRO DE CARBONO	PAPEL CARBONO CATALIZADOR PLATINO	N/A	110	44.1	15.95	86.89
13	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	FILTRO DE CARBONO	ESCAMAS DE CARBONO	N/A	110	44.4	15.32	88.91

Se realizó un análisis de la información contenida en la matriz inicial de datos para conocer el peso que el agua residual, como componente de mayor afectación, presentaba en la obtención de las variables de salida seleccionadas: densidad de potencia (DP), eficiencia coulombica (EC) y demanda química de oxígeno (DQO).

La densidad de potencia promedio reportada en el periodo de análisis fue de 485 mW/m², aunque el 75% de los datos tuvieron valores menores a 528.5 mW/m² (Gráfico 8.4). Estos resultados fueron analizados en trabajos que usaron agua residual como sustrato, con valores máximos reportados en sistemas con adición de ferricianuro a la cámara catódica (Moon y col., 2006; Fan y col., 2007; Zuo y col., 2007; Fan y col., 2008; Daniel y col., 2009; Patil y col., 2009 a; Zhang y col., 2009; Elakkiya y Matheswaran, 2013; Guo y col., 2013). En el periodo analizado (2003-2015) se observó que los valores de DP fueron incrementando desde <1 mW/m² (Jang y col., 2004; Daniel y col., 2009) hasta 7205 mW/m² ánodo (Cirick y col., 2014). Se reportaron 150 densidades de potencia en artículos que contenían agua residual como sustrato.

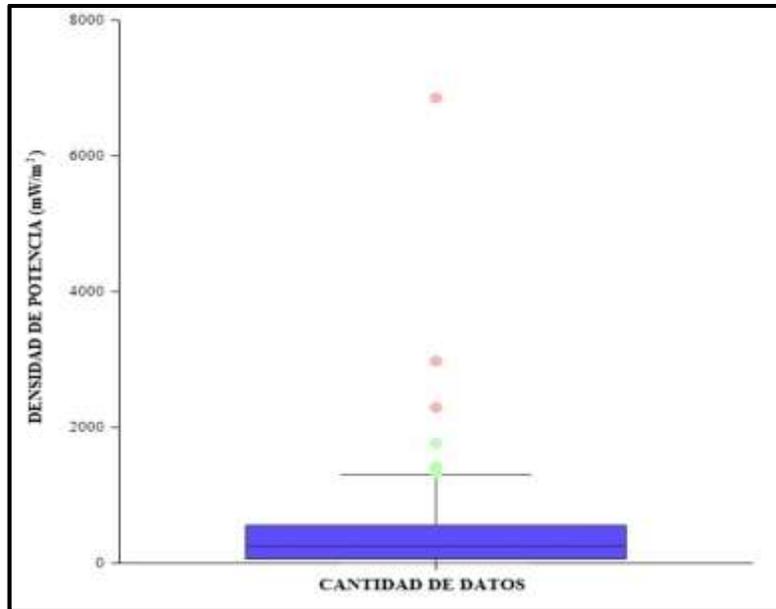


Gráfico 8.4 Diagrama de caja para los valores analizados de densidad de potencia y que fueron obtenidos en CCM usando agua residual como sustrato.

Cuando se analizaron los valores de eficiencia coulombica se encontró que el 75% de los datos alcanza el 34% de EC, con una media de 23.44% (Gráfico 8.5). Las eficiencias coulombicas de aguas residuales (sustrato) son bajas en comparación con sustratos simples como glucosa y acetato. Esto se produce debido a que al utilizar sustratos complejos se genera una distribución no uniforme en la generación de la biopelícula, creando limitaciones de transferencia de masa (Fornero y col., 2010).

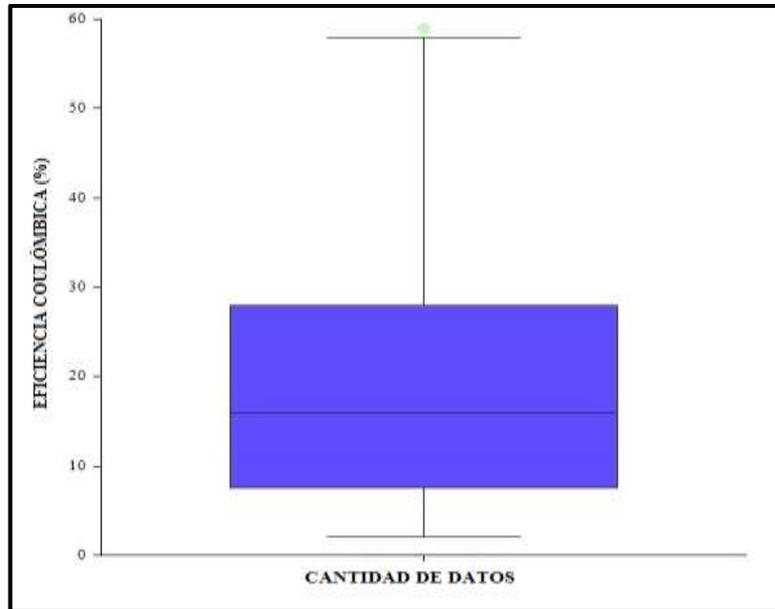


Gráfico 8.5. Diagrama de caja para los valores analizados de eficiencia coulombica y que fueron obtenidos en CCM usando agua residual como sustrato.

El porcentaje promedio de DQO removida fue de 73.45%, considerando que 75% de los valores fue mayor a 62.68% (Gráfico 8.6). Se encontró que el nivel de remoción de la DQO fue de hasta el 80% cuando el valor de la misma en el sustrato usado considera cantidades de 300 a 2500 mg/L (Ghangrekar y Shinde, 2006; Ghangrekar y Shinde, 2007; Feng y col., 2008; Jadhav y Ghangrekar; 2009; Rodrigo y col., 2009; Ahn y Logan, 2010; Cheng y col., 2010; Nam y col., 2010; Wen y col., 2010; Feng y col., 2011; Park y col., 2012; Elakkiya y Mathes, 2013; Malaeb y col., 2013; Mansoorian y col., 2013; Yang y col., 2013; Zhang y col., 2014; Ismail y Jaeel, 2015; Thung y col., 2015).

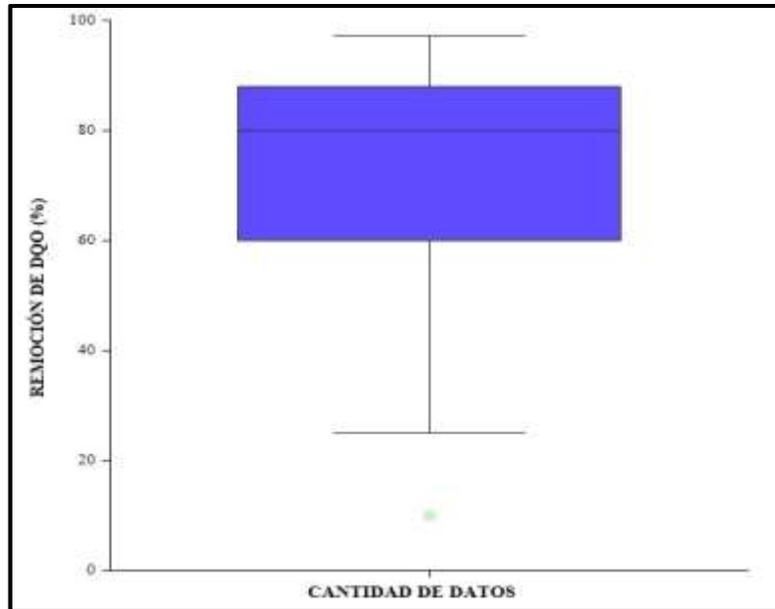


Gráfico 8.6 Diagrama de caja para los valores analizados de demanda química de oxígeno removida y que fueron obtenidos en CCM usando agua residual como sustrato.

Este análisis permitió identificar los valores promedio que se obtendrían usando el componente de agua residual como variable de mayor afectación sobre las variables de salida: DP, EC y DQO. Sin embargo, este análisis sobre la matriz inicial (Tabla 8.1) incluye un rango de volumen de la celda desde 59000 hasta 12 ml. Entonces, fue necesario excluir aquellas configuraciones de volúmenes menores a 500 ml ya este trabajo se enfoca en el escalamiento de las celdas a macroescala (Ren y col., 2012). Con esta consideración se obtuvieron 43 configuraciones factibles (Tabla 8.2) sobre las cuales se realizó el mismo análisis del peso del componente de sustrato para estudiar el efecto del aumento del volumen de la celda sobre las variables de salida (DP, EC, DQO).

8.2.2 Tamaño

A partir de la matriz anterior se obtuvieron los volúmenes de las CCM excluyendo a aquellas configuraciones de celdas con un volumen menor a 500 ml, ya que se pretende la optimización de la celda a escala comercial (macroescala).

Tabla 8.2 Matriz abreviada de componentes identificadas para la configuración técnica (teórica) viable de CCM, a macroescala.

	CELDA	INÓCULO	SUSTRATO	ÁNODO	CÁTODO	MEMBRANA	VOLUMEN (mL)	DENSIDAD DE POTENCIA (mW/m ²)	EFICIENCIA COULÓMBICA (%)	REMOCIÓN DE DQO (%)
1	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	PUNTE SALINO DE AGAR	1000	25	-	30
2	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A	10596	30.9	-	88
3	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	CABLES DE COBRE	CABLES DE COBRE Y ORO	PUNTE SALINO DE AGAR	1440	2.9	-	80
4	CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN-CATALIZADO R. PLATINO-NAFION	N/A	350	218	7	-
5	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	NAFION	PAPEL CARBÓN-CATALIZADO R. PLATINO	N/A	1500	164	-	88
6	CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	PAPEL GRAFITO	HOJAS DE GRAFITO	MIP NAFION 117	1500	230	21	86
39	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	VARILLA DE GRAFITO	PUNTE SALINO DE AGAR	10000	18.35	-	43.4
40	CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	2000	421.15	17.16	96.46
41	CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	FILTRO DE GRAFITO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE NANOTUBOS DE CARBÓN CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	650	285	-	-
42	CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE TITANIO RECUBIERTO DE PLATINO	MIP ULTREN CME 1000	600	87	-	-
43	CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	AGUA RESIDUAL	FILTRO DE CARBONO	FILTRO DE CARBONO	MIP NAFION 117	5000	16	-	94.1
44										

Al disminuir el número de valores para cada componente se obtuvieron cambios en los valores de las variables de salida, como se presentan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3 Comparación de los valores de salida de DP, EC y remoción de DQO.

Variable de salida	Valores incluyendo diferentes volúmenes de celda	Valores considerando solo volúmenes de celda a macroescala
Densidad de potencia (mW/m ²)	485	251.2
Eficiencia coulóbica (%)	23.4	18.5
Remoción de demanda química de oxígeno (%)	73.4	95

Se observó un cambio drástico en el valor promedio de densidad de potencia obtenido, de 51.79 % menos del valor calculado considerando todas las CCM revisadas. Este resultado

indicó que el aumento en volumen de la celda tuvo un efecto negativo sobre la densidad de potencia obtenida en el sistema. Según Oh y col. (2010) al realizar el escalamiento de los reactores resulta difícil mantener la homogeneidad del sistema, afectando la tasa de transferencia de masa y velocidad de reacción, y por ende, la producción de electricidad. En este mismo sentido, Liu y col. (2008) indican que, al aumentar el volumen de la celda, se produce una separación de los electrodos, afectando la resistencia y la densidad de energía interna específica por área. Entonces para mantener la densidad de potencia en un reactor macroescala se debe tener cuidado en reducir la separación entre los electrodos.

Según el Gráfico 8.7, el 75% de los datos presentaron valores menores a 500 mW/m^2 , con 5 valores atípicos de 7205, 6860, 4250, 2981 y 2650 mW/m^2 . La máxima densidad de potencia fue reportada por Kaewkannetra y col. (2011) utilizando un reactor de volumen de trabajo de 30 l y agua residual de un molino de mandioca.

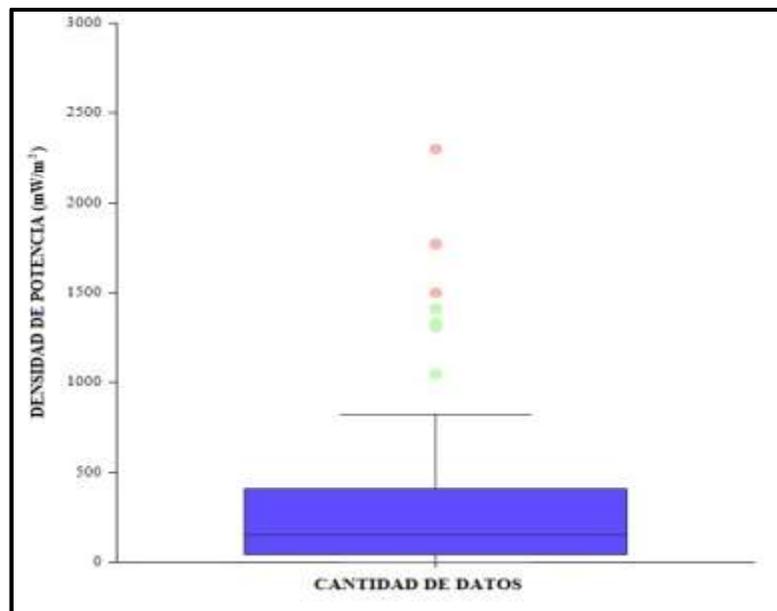


Gráfico 8.7 Diagrama de caja para los valores analizados de densidad de potencia y que fueron obtenidos en CCM macroescala, usando agua residual como sustrato.

Los valores de eficiencia coulombica no sufrieron una drástica disminución, siendo de aproximadamente el 20% (Tabla 8.3). Según el Gráfico 8.8, el 75% de los datos analizados

fueron menores a 30% de EC. Esto podría deberse a que la eliminación de los equivalentes reductores (electrones) de la cámara anódica fue similar a la disminución de la concentración de DQO de las aguas residuales. Por lo tanto, como el cálculo de la eficiencia coulombica para la oxidación de un sustrato orgánico en la cámara anódica se realiza basándose en el porcentaje de remoción de DBO o DQO en la cámara y la corriente eléctrica generada en dicha cámara, lo que resulta en menor materia orgánica disponible para la producción de electricidad y por lo tanto la reducción de la eficiencia coulombica (Fornero y col., 2010).

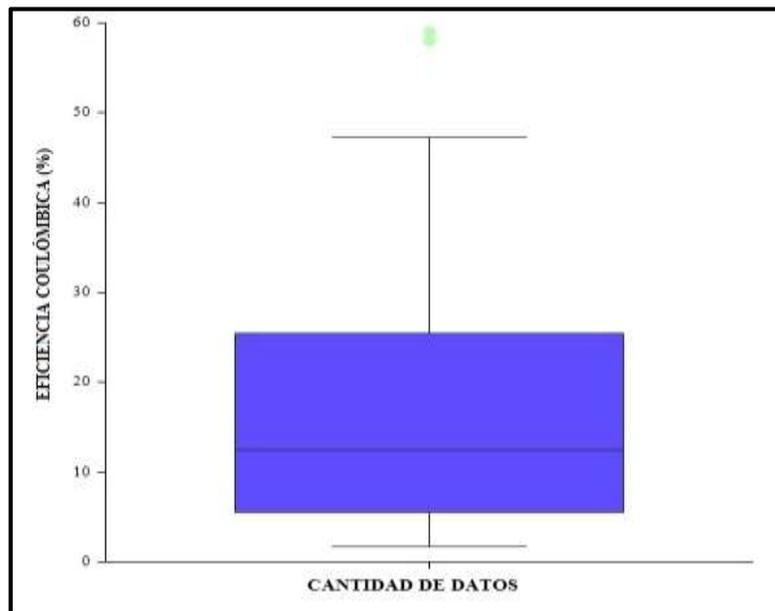


Gráfico 8.8 Diagrama de caja para los valores analizados de eficiencia coulombica obtenidos en CCM a macroescala, usando agua residual como sustrato.

En el caso de la DQO removida se obtuvo que el 75% de los datos fueron valores en el rango del 80 al 95% (Gráfico 8.9), en celdas con diferentes tipos de aguas residuales. Estos valores de eficiencia en la remoción de DQO fueron comparables con los obtenidos en reactores anaerobios de flujo ascendente (por sus siglas en inglés, UASB) (Duteanu y col., 2010).

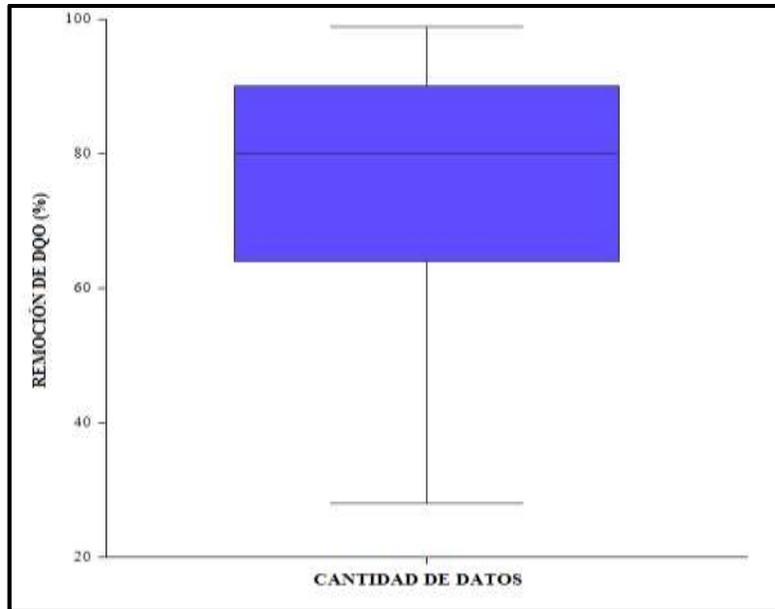


Gráfico 8.9 Diagrama de caja para los valores analizados de demanda química de oxígeno removida y que fueron obtenidos en CCM a macroescala, usando agua residual como sustrato.

8.2.3 Diseño

Para completar el diseño de la celda propuesta técnicamente factible se realizó un análisis de las variables con menor grado de afectación según el análisis Taguchi, como son: configuración, membrana, ánodo y cátodo. Este estudio se realizó sobre los datos incluidos en las 43 configuraciones macroescala presentadas en la matriz abreviada de configuraciones (Tabla 8.2, Anexo 2). Se incluyó también la variable de geometría de la celda que, aunque no fue considerada en el estudio de afectación, si tiene importancia para el escalamiento.

Según el Gráfico 8.10, se han realizado mayor número de trabajos con CCM de cámara sencilla (58.1%). Esto puede deberse a su bajo costo y al aumento en la densidad de potencia comparado a las CCM de doble cámara. Otra desventaja de gran importancia es que, en los reactores de dos cámaras, el catolito debe estar aireado para proporcionar oxígeno al cátodo (Liu y Logan, 2004), lo que conlleva a la necesidad de sopladores y un aumento en los costos de equipos y energía.

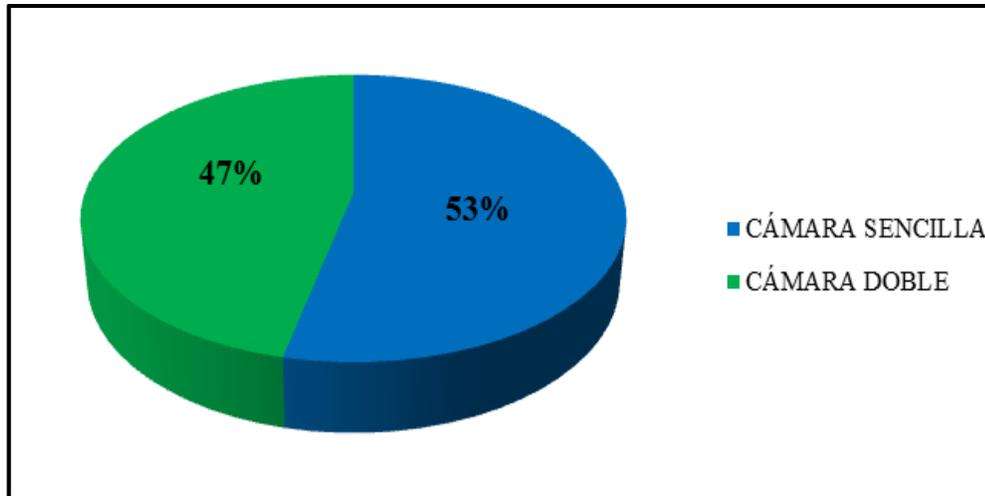


Gráfico 8.10 Distribución de frecuencia para la configuración de la CCM.

Cuando se realizan los estudios de escalamiento es necesario considerar los costos de materiales y construcción, haciendo que las CCM de doble cámara no resulten viables para su escalamiento. Así, las CCM de cámara sencilla son las más usadas en estudios de implementación práctica, debido a los altos valores de DP obtenidos, disminución de resistencia interna y de costos (Liu y Logan, 2004; Liu y col., 2005a), en comparación a las CCM de cámara doble (Zhang, 2012).

En los últimos años diversos estudios han reportado las CCM con geometría de tipo tubular (Rabaey y col., 2005; Clauwaert y col., 2007; Kim y col., 2010), debido a que incrementa el tiempo de retención de los lodos y reduce el tiempo de retención hidráulica, lo que disminuye el costo de operación a largo plazo (Oh y col., 2010).

El material de membrana intercambiadora de protones usado con mayor frecuencia en las CCM es el nafion (Gráfico 8.11), ya sea para las celdas de doble cámara o para aquellas de cámara sencilla que llevan prensado al cátodo dicho material. Otros materiales reportados como MIP son el CMI-7000 y el puente salino. Una de las limitantes para el uso de MIP en CCM de doble cámara son las incrustaciones de sólidos en suspensión y contaminantes solubles en la misma, cuando se usan para el tratamiento de aguas residuales a escala (Duteanu y col., 2010).

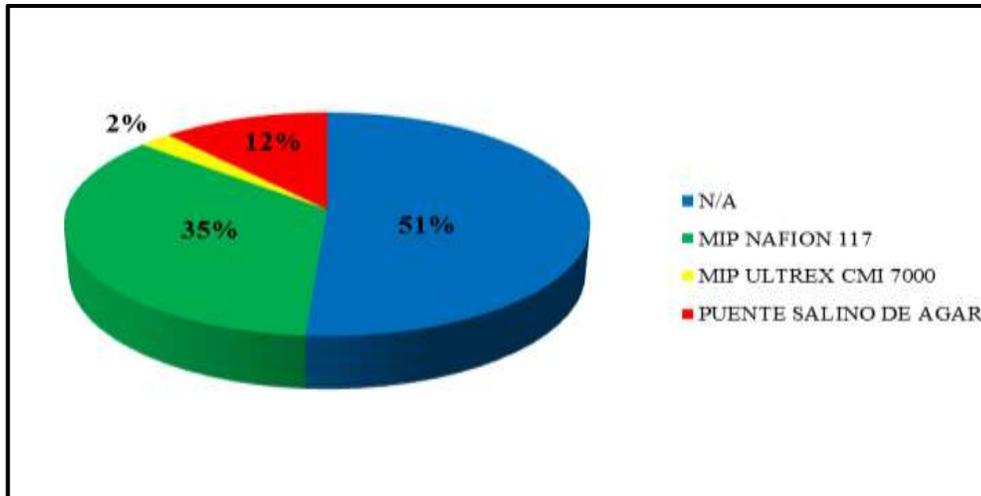


Gráfico 8.11 Distribución de frecuencia para el tipo de membrana de la CCM.

La mayoría de los materiales para ánodos son materiales a base de carbono: papel carbón, papel grafito, placa de grafito, barra de grafito (Gráfico 8.12). Una de las principales causas de utilizar este tipo de materiales es por su bajo costo durante el escalamiento en comparación a electrodos metálicos. La placa de grafito es el material más reportado, por sus características económicas, facilidad de modelar y de escalamiento, así como que cuentan con un área superficial definida y estable para las comunidades microbianas, (Logan y col., 2006).

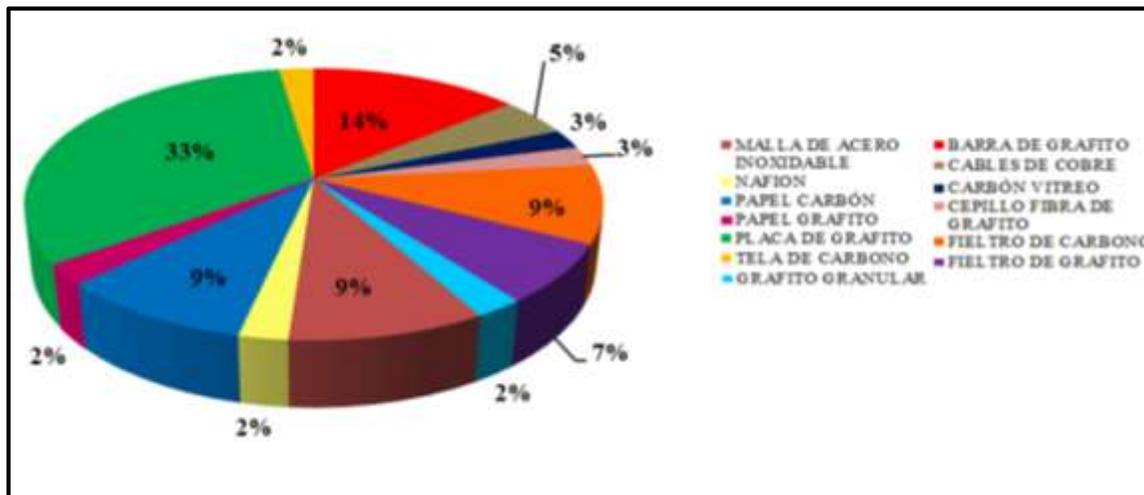


Gráfico 8.12 Distribución de frecuencia para el tipo de ánodo de la CCM.

8.3 Análisis Económico

Este estudio consiste en la recopilación, análisis y evaluación de información para determinar si se debe establecer o no un proyecto. El análisis económico tiene como objetivo determinar cuál es el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto a escala comercial, como es la inversión inicial, el costo total de la operación de la planta, así como otra serie de indicadores que servirán como base para definir la viabilidad del mismo (Beristain, 2006).

8.3.1 Capital fijo

Los costos necesarios para la instalación de la CCM teórica, dentro de un proyecto, se presentan en la Tabla 8.4, considerando que corresponde con una planta de procesamiento de fluidos. Bajo esta consideración fueron incluidos factores como tuberías (tubo, válvulas, soportes, bridas), instrumentación (medidores válvulas de control, analizadores), electricidad (subestación, generadores de emergencia, cableado). No fueron considerados: equipo de montaje, desarrollo del sitio y edificios auxiliares, ya que normalmente es una inversión contemplada por la empresa establecida.

Tabla 8.4 Factores para la estimación del costo de capital fijo de una CCM (Coulson y Richardson 2005).

Costos de equipo	Fluido
Equipo de montaje	-
Tubería	0.7
Instrumentación	0.2
Electricidad	0.1
Edificios, proceso	0.15
Servicios	0.5
Almacenamiento	0.15
Desarrollo del sitio	-
Edificios auxiliares	-

Costo total de la planta física	2.8
--	------------

8.3.1.1 Costo total de los principales elementos

Los elementos que se consideraron para el cálculo del costo total incluyeron maquinaria y aparatos, elementos mecánicos (bombas, compresores, turbinas) y de calderería (reactores, columnas, intercambiadores) necesarios para el correcto funcionamiento del proceso de la CCM. Las especificaciones de cada elemento considerado fueron las siguientes:

- ❖ Celda: acrílico en forma tubular.
- ❖ Electrodo: incluyendo ánodo y cátodos, para ambos se utilizará placa de grafito sin tratamiento previo.
- ❖ Alambre de cobre.
- ❖ Bomba peristáltica: con una potencia de 37 W que será capaz de bombear el agua residual de manera continua.

El costo total de los materiales se presenta en la Tabla 8.5, obtenidos de datos comerciales por diferentes empresas especialistas del sector. Los costos de los materiales fueron cotizados considerando el funcionamiento de una CCM con un volumen de 100 L.

Tabla 8.5 Costo total de total de los principales elementos para una CCM.

Componente	Precio (MXN)
Celda	\$ 25,000.00
Ánodo	\$ 5,257.80
Cátodo	\$ 5,257.80
Cable de cobre	\$ 277.99
Bomba	\$ 21,050.00
Costo total	\$ 56,843.59

El costo total de la instalación de la CCM teórica propuesta se obtuvo bajo la siguiente relación:

$$C_f = f_L C_e$$

$$C_f = \$56,843.59 \text{ MXN} \times 2.8 = \$ 159,162.05 \text{ MXN}.$$

La estimación del capital fijo se calculó multiplicando el costo total de la CCM por el factor de los costos indirectos, considerando los siguientes costos:

- ❖ Diseño de ingeniería: licencias, transporte de los equipos y materiales que intervienen en la obra, costo de la ingeniería básica y de detalle realizada en el proyecto, la supervisión de construcción y puesta en marcha, etc.
- ❖ Honorarios de contratistas: en nuestro caso no son necesarios contratistas para la instalación de la CCM.
- ❖ Contingencia: asignación incorporada para cubrir imprevistos (errores de diseño, mal funcionamiento de la CCM).

Así entonces el capital fijo obtenido fue de \$222,826.88 MXN, considerando el factor de 1.4 (Tabla 8.6).

Tabla 8.6 Costos indirectos para la instalación de una CCM.

Costos	Fluido
Diseño de ingeniería	0.3
Honorarios del contratista	-
Contingencia	0.1
Capital fijo	1.4

8.3.2 Inversión total

Se realizaron los cálculos necesarios, incluyendo el costo de:

- ❖ Puesta en marcha.
- ❖ Las materias primas y productos intermedios en el proceso.
- ❖ Los inventarios de productos terminados.
- ❖ Los fondos para cubrir las cuentas pendientes de pago de los clientes.

Se obtuvo un valor de inversión total de \$233,968.22 MXN.

8.3.3 Costo de operación anual

Para obtener este valor se consideró una eficiencia del proceso en 80%, con un tiempo de funcionamiento de 365 días y 24 horas. Así el costo anual de funcionamiento de la CCM fue calculado considerando 7008 h/año.

8.3.3.1 Costos directos de operación

Son los costos que dependen directamente de la operación de la CCM y se dividen en costos variables y costos fijos.

8.3.3.1.1 Costos variables

Son aquellos en los que el costo total cambia en proporción directa a los cambios en el volumen, en tanto que el costo unitario permanece constante. El costo variable total (Tabla 8.7) se calculó a partir de las siguientes consideraciones:

- ❖ Materias primas: son los productos necesarios para el tratamiento del efluente. Las cantidades se pueden obtener a partir de la ficha técnica, multiplicando por las horas de funcionamiento al año. Estas incluyen: agua corriente y solución amortiguadora de fosfatos (KCl , K_2HPO_4 , KH_2PO_4).

- ❖ Materiales diversos: son los productos que no están cubiertos por las materias primas o materiales de mantenimiento. Se estimó un 10% del mantenimiento según los factores establecidos por Coulson y Richardson (2005).
- ❖ Servicios: el único servicio requerido es la electricidad y este se calculó a través de la ficha técnica de la bomba peristáltica y el costo de la energía utilizada anualmente.
- ❖ Envío y embalaje: se refiere al envasado y transporte del producto. El agua tratada será vertida al alcantarillado público por lo tanto se consideró un costo de \$0.

Tabla 8.7 Costos variables de instalación de una CCM

Costos variables	Precio (MXN)
Materias primas	\$ 21,787.59
Materiales diversos	\$ 1,114.13
Servicios: electricidad	\$ 462.20
Envío y embalaje	\$ -
Total	\$ 23,363.93

8.3.3.1.2 Costos fijos

En la Tabla 8.8 se presentan los costos fijos necesarios para la implementación de una CCM, de acuerdo con las consideraciones expuestas en el apartado 7.3.2.

Tabla 8.8 Costos fijos de la CCM propuesta

Costos fijos	Precio (MXN)
Mantenimiento	\$ 11,141.34
Mano de obra	\$ 180,000.00
Supervisión	\$ -
Gastos generales	\$ 90,000.00
Laboratorio	\$ 54,000.00

Cargas de capital	\$	22,282.69
Seguro	\$	2,228.27
Impuestos	\$	-
Regalías	\$	-
Total	\$	359,652.30

Costos directos de producción	\$	383,016.23 MXN
--------------------------------------	-----------	-----------------------

8.3.3.2 Costos indirectos de operación

Son los recursos necesarios para desarrollar las actividades de producción, comercialización o apoyo, pero que en el momento de obtener el costo del producto terminado no son fácilmente identificables de forma directa con el mismo. Para este proyecto se consideraron como \$0.00, ya que se implementarán en una empresa instalada (Tabla 8.9).

Tabla 8.9 Costos indirectos de producción.

Costos indirectos	Precio (MXN)
Expensas de ventas	\$ -
Gastos generales	\$ -
Investigación y desarrollo	\$ -
Total	\$ -

Así entonces, la suma de los costos directos de producción más los costos indirectos componen el costo de operación anual de la CCM.

Costo de operación anual	\$	383,016.23 MXN
---------------------------------	-----------	-----------------------

8.4 Criterio de viabilidad económica

En función de los resultados obtenidos y a los datos considerados por Kaewkannetra y col. (2011) se estimó la viabilidad del proyecto. Los datos publicados por Kaewkannetra y col. (2011) fueron considerados debido a que la configuración de CCM es similar a la identificada como celda teórica técnicamente factible en este trabajo. Además, en la publicación se graficó la densidad de potencia en función del tiempo necesaria para calcular la densidad de potencia anual producida por una CCM (Gráfico 8.14).

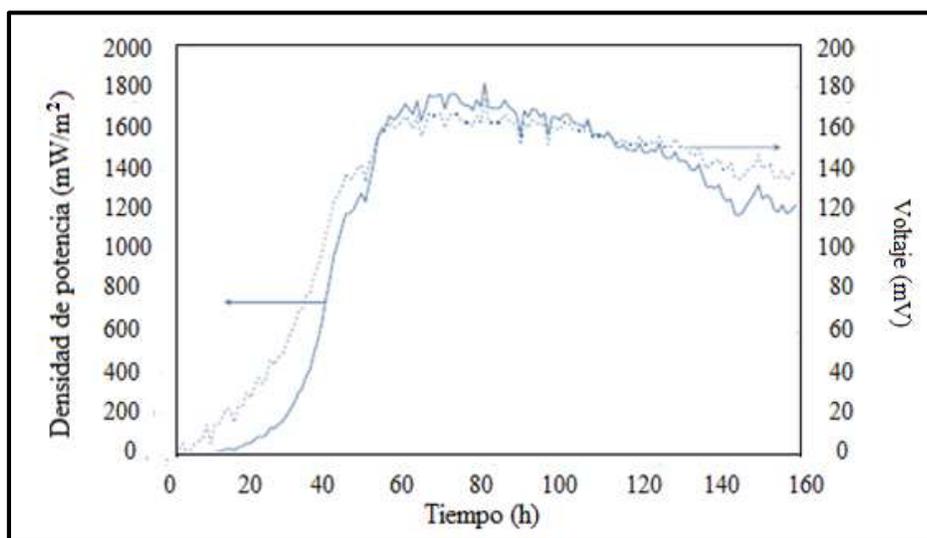


Gráfico 8.14 Densidad de potencia y voltaje en función de una CCM.

Para identificar la cantidad de densidad potencia acumulada de este artículo, se calculó la integral del área bajo la curva a partir del programa Origin[®] Pro 9.0, obteniendo un valor de 187720 mWm²/h.

Se realizaron los cálculos de conversión necesarios para determinar la cantidad de potencia generada por hora, anualmente en una CCM de 100 L obteniendo un valor de 5.011 KWh/año.

Otras consideraciones planteadas fueron:

- ❖ **Tiempo de vida de la planta:** se tomaron en cuenta 15 años, similar a la consideración del trabajo de Lobato y col. (2014).

- ❖ **Tasa de descuento:** este valor se obtuvo a partir de la TIE (Tasa Interbancaria de Equilibrio), que corresponde con un valor establecido por el Banco de México y que se refiere al costo que tiene el dinero que se prestan entre los bancos del país. Este valor es ampliamente utilizado para determinar la tasa de interés impuesta por los bancos en los créditos que ofrecen. La tasa de descuento presentada es del 4.25% y corresponde al día 17 de julio del 2016.
- ❖ **El ingreso por KWh:** este valor fue determinado a partir de los datos promedios publicados por la CFE (Comisión Federal de Electricidad) en el año corriente. El costo por KWh es de \$ 0.03 MXN.
- ❖ **Certificados de Energía Limpia (CELS):** son un instrumento de mercado, aplicado en México a partir de la Reforma Energética establecida por el Gobierno Federal (Diciembre, 2013). Estos instrumentos comúnmente se utilizan para alcanzar objetivos de política energética y ambiental. Su meta concreta en México es que se tenga un mayor despliegue de tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de fuentes diferentes a los combustibles fósiles (Morodo y col., 2016). Un **CELS** equivale a **U\$S 25 por KWh generado**.

8.4.1 Cálculos de viabilidad

En la Tabla 8.10 se exponen la suma de la inversión total más el costo de operación anual, para calcular el egreso anual de la CCM. El ingreso total anual fue calculado sumando los ingresos por KWh/año más los CELs adquiridos. La diferencia entre el egreso total anual y el ingreso total anual se denomina flujo de caja, este es necesario para el cálculo del valor presente neto, la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación de capital.

Tabla 8.10 Resultados obtenidos para los flujos de efectivo.

	EGRESO TOTAL ANUAL	INGRESO TOTAL ANUAL	FLUJO DE EFECTIVO	FLUJO ACUMULADO
0	\$ 233,968.22	\$ -	-\$ 233,968.22	-\$ 233,968.22
1	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 614,479.31
2	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 994,990.39
3	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 1,375,501.47
4	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 1,756,012.56
5	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 2,136,523.64
6	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 2,517,034.72
7	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 2,897,545.81
8	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 3,278,056.89
9	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 3,658,567.97
10	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 4,039,079.06
11	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 4,419,590.14
12	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 4,800,101.22
13	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 5,180,612.31
14	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 5,561,123.39
15	\$ 383,016.23	\$ 2,505.15	-\$ 380,511.08	-\$ 5,941,634.47

En la Tabla 8.10 se observan los flujos de cajas negativos, ya que el egreso anual supera ampliamente al ingreso anual. Esto indica que el VPN y la TIR para una tasa de descuento del 4.25% son negativos. De esta forma se logra inferir que no es posible la factibilidad económica de una CCM de 100 L con las especificaciones obtenidas en el análisis técnico.

VPN	-\$ 4,391,631.19 MXN
------------	----------------------

Para obtener una recuperación de capital menor a 15 años es necesario generar 800 KWh/año, este valor se encuentra muy por encima de lo generado actualmente por estas celdas.

9 ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA LA CCM PROPUESTA

La tecnología ambiental actual ofrece alternativas de procesos acoplados cuando se trabaja con tratamiento de efluentes, que permiten incorporar operaciones primarias, secundarias y terciarias, para eliminar o disminuir el contenido de los mismos en una forma secuencial y que asegure el éxito en la remoción de material contaminante. Por ejemplo, Lobato y col. (2014) realizaron un estudio de viabilidad económica de la implementación de una CCM en una planta de tratamiento de aguas residuales. Los resultados obtenidos para el VPN mostraron que la incorporación de la CCM podría proporcionar un ahorro comprendido entre un 10 y 20 % aproximadamente dependiendo de un escenario pesimista u optimista, respectivamente, en comparación con un tratamiento de lodos activados; teniendo en cuenta un tiempo de vida de la planta de 15 años.

De acuerdo al análisis de datos realizado en este trabajo y lo señalado por otros autores, la incorporación de la CCM propuesta a un tren de tratamiento de efluentes es altamente factible (Pant y col., 2012; Hernández-Fernández y col., 2015). Principalmente si se considera como un tratamiento secundario que permitiría alcanzar altos valores de remoción de contaminantes y además entregar electricidad, del 10 al 20 % que puede ser utilizada para otros procesos (Huggins y col., 2013; Pant y col., 2010). Una ventaja de gran importancia para su consideración en tratamiento de efluentes es el alto porcentaje de remoción de DQO que se alcanza con esta tecnología, con valores alrededor del 80% (Ghangrekar y Shinde, 2006; Ghangrekar y Shinde, 2007; Feng y col., 2008; Jadhav y Ghangrekar, 2009; Rodrigo y col., 2009; Ahn y Logan, 2010; Cheng y col., 2010; Nam y col., 2010; Wen y col., 2010; Feng y col., 2011; Park y col., 2012; Elakkiya y Mathes, 2013; Malaeb y col., 2013; Mansoorian y col., 2013; Yang y col., 2013; Zhang y col., 2014; Ismail y Jaeel, 2015; Thung y col., 2015).

En el caso de la operación de sistemas de tratamiento de efluentes, las CCM ofrecen una atractiva ventaja con respecto a los sistemas de lodos activados tradicionales donde la aireación puede abarcar el 45 al 75% de los costos energéticos de la planta (Huggins y col., 2013; Pant y col., 2010). Otro beneficio de las CCM es la baja producción de biomasa, la cual

es menor que la obtenida en reactores de lodo activados, con una producción de lodos reducida de un 50 al 70% (Fan y col, 2012; Huggins y col., 2013), que tiene un efecto significativo en la reducción de los costos de operación de la planta (Wang y Ren, 2013).

10 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que es posible obtener configuraciones teóricas técnicamente factibles usando la bibliografía publicada hasta la fecha. Sin embargo, la configuración técnica usada en este trabajo no resultó económicamente factible para usarse a macroescala, volumen de 500 ml a 100 l, para la producción de electricidad. Para lograr su viabilidad sería necesario realizar estudios experimentales que determinen su factibilidad técnica real así como promover mayores esfuerzos en investigación básica en estos sistemas con visión de aplicaciones prácticas a gran escala, debido a la gran cantidad de factores que afectan a las CCM y considerando la alternativa tecnológica propuesta.

11 RECOMENDACIONES

- ❖ Mayor investigación en las dimensiones y materiales de los electrodos, para lograr mayores áreas superficiales a menores costos.
- ❖ El estudio exhaustivo en caracterización de las aguas residuales utilizadas en este tipo de tecnologías, ya que nos puede ayudar a entender y optimizar el uso de este tipo de sustrato.
- ❖ Es necesario considerar la construcción de celdas de combustible microbianas a macroescala que permitan entender las limitaciones ocurridas en el escalamiento, ya que estas pueden presentar nuevos desafíos y limitaciones.
- ❖ La homologación de unidades reportadas para las diferentes variables de salida que permitan rápido un análisis y comparación de las diferentes configuraciones de CCM.
- ❖ La determinación de los parámetros de operación óptimos a macroescala para las CCM permitirían incrementar la producción de electricidad.
- ❖ Una posibilidad para aplicar esta tecnología a escala industrial es utilizarla para el tratamiento de efluentes industriales debido a sus altas eficiencias de remoción de demanda química de oxígeno.

12 BIBLIOGRAFÍA

1. Abourached, C.; Lesnik, K.; Liu, H. "Enhanced power generation and energy conversion of sewage sludge by CEA-microbial fuel cells". *Bioresource Technology*. Vol. 166. P. 229-234, 2014.
2. Aelterman, P.; Rabaey, K.; Clauwaert P.; Verstraete, W. "Microbial fuel cells for wastewater treatment". *Water Science and Technology*. Vol. 54. P. 9-15, 2006a.
3. Aelterman, P.; Rabaey, K.; Hai, P.; Boon, N.; Verstraete, W. "Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 40. P. 3388-3394, 2006b.
4. Aelterman, P.; Versichele, M.; Marzorati, M.; Boon, N.; Verstraete, W. "Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes". *Bioresource Technology*. Vol. 99. P. 8895- 8902, 2008.
5. Ahn, Y.; Logan, B. "Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 469-475, 2010.
6. Aldrovandi, A.; Marsili, E.; Paganin, P.; Tabacchioni, S.; Giordano, A. "Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 3252-3260, 2009.
7. Alper, N.; Ramazan, Y.; Erdem, M. "Analysis of past experimental data in literature to determine conditions for high performance in biodiesel production". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Vol. 10. P. 422-434.
8. Alzate-Gaviria, L.; González, I.; Peraza, O.; García, J.; Domínguez, J.; Vázquez, M. "Evaluación del desempeño e identificación de exoelectrógenos en dos tipos de celdas de combustible microbianas con diferente configuración en el ánodo". *Interciencia*. Vol. 35. P. 19-25, 2010.
9. Anupama, S.; Pradeep, N.; Hampannavar, U. "Microbial fuel cell an alternative for COD removal of distillery wastewater". *Journal of Research in Biology*. Vol. 6. P. 419-423, 2011.
10. Babir, F. "PEM fuel cells: Theory and practice". California, USA. Elsevier Academic Press. 2005.
11. Barton, S.; Gallaway, J.; Atanassov, P. "Enzymatic biofuel cells for implantable and microscale devices". *Chemical Reviews*. Vol. 104. P. 4867-4886, 2004.
12. Behera, M.; Jana, P.; Ghangrekar, M. "Performance evaluation of low cost microbial fuel cell fabricated using earthen pot with biotic and abiotic cathode". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 1183-1189, 2010.
13. Beristain, M. "Formulación y evaluación de proyectos de inversión en México". P. 1-26, 2006.
14. Berk, R.; Canfield, J. "Bioelectrochemical energy conversion". *American Society for Microbiology*. Vol. 12. P. 10-12, 1964.
15. Biffinger, W.; Byrd, J.; Dudley, B.; Ringeisen, B. "Oxygen expo sure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells". *Biosensors and Bioelectronics*. Vol. 23. P. 820-826, 2008.
16. Bond, D.; Holmes, D.; Tender, L.; Lovley, D. "Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments". *Science*. Vol. 295. P. 483-485, 2002.
17. Borole, A.; Hamilton, C.; Vishnivetskaya, T.; Leak, D.; Andras, C. "Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems". *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 48. P. 71-80, 2009.

18. Borole, A.; Reguera, G.; Ringeisen, B.; Wang, Z.; Feng, Y.; Kim, B. "Electroactive biofilms: Current status and future research needs". *Energy and Environmental Science*. Vol. 4. P. 4813–4834, 2011.
19. Call, D.; Merrill, M.; Logan, B. "High surface area stainless steel brushes as cathodes in microbial electrolysis cells (MECs). *Environmental Science and Technology*. Vol. 43. P. 2179–2183, 2009.
20. Camposeco-Negrete, C. "Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 53. P. 195-203, 2013.
21. Cao, X.; Huang, X.; Liang, P.; Xiao, K.; Zhou, Y.; Zhang, X.; Logan, B. "A new method for water desalination using microbial desalination cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 43. P. 7148-7152, 2009.
22. Catal, T.; Li, K.; Bermek, H.; Liu, H. "Electricity production from twelve mono saccharides using microbial fuel cells". *Journal Power Sources*. Vol. 175. P. 196-200, 2008.
23. Catal, T.; Bermek, H.; Liu, H. "Removal of selenite from wastewater using microbial fuel cells". *Biotechnology Letters*. Vol. 31. P. 1211-1216, 2009.
24. Cercado-Quezada, B.; Delia, M.; Bergel, A. "Testing various food-industry wastes for electricity production in microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 2748-2754, 2010.
25. Chae, K.; Choi, M.; Ajayi, F.; Park, W.; Chang, I.; Kim, I. "Mass transport through a proton exchange membrane (nafion) in microbial fuel cells". *Energy and Fuels*. Vol. 22. P. 169-176, 2008.
26. Chae, K.; Choi, M.; Lee, J.; Kim, K.; Kim, I. "Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 3518-3525, 2009.
27. Chang, I.; Jang, K.; Gil, G.; Kim, M.; Kim, H.; Cho, B.; Kim, B. "Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor". *Biosensors and Bioelectronic*. Vol. 19. P. 607-613, 2004.
28. Chen, L.; Chu, C.; Chen, K.; Chen, P.; Hu, S.; Liu, R. "An intelligent approach to the discovery of luminescent materials using a combinatorial approach combined with Taguchi methodology". *Luminescence*. Vol. 26. P. 229-238, 2011a.
29. Chen, Y.; Zhao, Y.; Qiu, K.; Chu, J.; Lu, R.; Sun, M.; Liu, X.; Sheng, G.; Yu, H.; Chen, J.; Li, W.; Liu, G.; Tian, Y.; Xiong, Y. "An innovative miniature microbial fuel cell fabricated". *Biosensors and Bioelectronics*. Vol. 26. P. 2841-2846, 2011b.
30. Chen, S.; Liu, G.; Zhang, R.; Qin, B.; Luo, Y. "Development of the microbial electrolysis desalination and chemical-production cell for desalination as well as acid and alkali productions". *Environmental Science and Technology*. Vol. 46. P. 2467-2472, 2012a.
31. Chen, S.; Liu, G.; Zhang, R.; Qin, B.; Luo, Y.; Hou, Y. "Improved performance of the microbial electrolysis desalination and chemical production cell using the stack structure". *Bioresource Technology*. Vol. 116. P. 507-511, 2012b.
32. Chen, M.; Zhang, F.; Zhang, Y.; Zeng, R. "Alkali production from bipolar membrane electro dialysis powered by microbial fuel cell and application for biogas upgrading". *Applied Energy*. Vol. 103. P. 428-434, 2013.
33. Cheng, S.; Liu, H.; Logan, B. "Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochemistry Communications*. Vol. 8. P. 489-494, 2006a.

34. Cheng, S.; Liu, H.; Logan, B. "Power densities using different cathode catalysts (Pt and CoTMPP) and polymer binders (Nafion and PTFE) in single chamber microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 40. P. 364-369, 2006b.
35. Cheng, S.; Logan, B. "Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells". *Electrochemistry Communications*. Vol. 9. P. 492-496, 2007.
36. Cheng, J.; Zhu, X.; Ni, J.; Borthwick, A. "Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 2729-2734, 2010.
37. Chookaew, T.; Prasertsan, P.; Ren, Z. "Two-stage conversion of crude glycerol to energy using dark fermentation linked with microbial fuel cell or microbial electrolysis cell". *New Biotechnology*. Vol. 31. P. 179-184, 2014.
38. Chu, S.; Majumdar, A. "Opportunities and challenges for a sustainable energy future". *Nature*. Vol. 488. P. 294-303, 2012.
39. Cirik, K. "Optimization of bioelectricity generation in fed-batch microbial fuel cell: effect of electrode material, initial substrate concentration, and cycle time". *Biotechnology and Applied Biochemistry*. Vol. 173. P. 205-214, 2014.
40. Clauwaert, P.; Van der Ha, D.; Boon, N.; Verbeken, K.; Verhaege, M.; Rabaey, K. "Open air biocathode enables effective electricity generation with microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 41. P. 7564-7569, 2007.
41. Coulson, J.; Richardson, J. "Chemical engineering design, fourth edition: chemical engineering (Coulson and Richardson's chemical engineering)". London, UK. Elsevier Academic Press. Vol. 6. P. 242-282, 2005.
42. Crittenden, S.; Sund, C.; Sumner, J. "Mediating electron transfer from bacteria to a gold electrode via a self-assembled monolayer". *Langmuir*. Vol. 22. P. 9473-9476, 2006.
43. Cusick, R.; Logan, B. "Phosphate recovery as struvite within a single chamber microbial electrolysis cell". *Bioresource Technology*. Vol. 107. P. 110-115, 2012.
44. Daniel, D.; Mankidy, B.; Ambarish, K.; Manogari, R. "Construction and operation of a microbial fuel cell for electricity generation from wastewater". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 34. P. 7555-7560, 2009.
45. Dávila, D.; Esquivel, J.; Sabaté, N.; Mas, J. "Silicon-based microfabricated microbial fuel cell toxicity sensor". *Biosensors and Bioelectronic*. Vol. 26. P. 2426-2430, 2011.
46. DeLong, E.; Chandler, P. "Power from the deep". *Nature Biotechnology*. Vol. 20, P. 788-789, 2002.
47. Dhavlikar, M.; Kulkarni, M.; Mariappan, V. "Combined Taguchi and dual response method for optimization of a center less grinding operation". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 132. P. 90-94, 2003.
48. Di Lorenzo, M.; Scott, K.; Curtis, T.; Head, I. "Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell". *Chemical Engineering Journal*. Vol. 156. P. 40-48, 2010.
49. Digman, B.; Kim, D. "Review: Alternative energy from food processing wastes". *Environmental Progress*. Vol. 27. P. 524-537, 2008.
50. Domingo, A.; Valero, A. "Estudio de factibilidad técnico económico financiero para la instalación de una fábrica de bolsas plásticas". *Universidad Católica Andrés Bello*. P. 1-92, 2005.
51. Domínguez-Garay, A.; Berná, A.; Ortiz-Bernad, I.; Esteve- Núñez, A. "Silica colloid formation enhances performance of sediment microbial fuel cells in a low conductivity soil". *Environmental Science and Technology*. Vol. 47. P. 2117-2122, 2013.

52. Dong, H.; Yu, H.; Wan, X.; Zhou, Q.; Sun, J. "Carbon-supported perovskite oxides as oxygen reduction reaction catalyst in single chambered microbial fuel cells". *Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 88. P. 774-778, 2013.
53. Du, Z.; Li, H.; Gu, T. "A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy". *Biotechnology Advances*. Vol. 25. P. 464-482, 2007.
54. Dumas, C.; Basseguy, R.; Bergel, A.; "Electrochemical activity of *Geobacter sulfurreducens* biofilms on stainless steel anodes". *Electrochimica Acta*. Vol. 53. P. 5235-5241, 2008a
55. Dumas, C.; Basseguy, R.; Bergel, A. "Microbial electrocatalysis with *Geobacter sulfurreducens* biofilm on stainless steel cathodes". *Electrochimica Acta*. Vol. 53. P. 2494-2500, 2008b.
56. Duteanu, N.; Ghangrekar, M.; Erable, B.; Scott, K. "Microbial fuel cells: An option for wastewater treatment". *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol. 9. P. 1069-1087, 2010.
57. Elakkiya, E.; Matheswaran, M. "Comparison of anodic metabolisms in bioelectricity production during treatment of dairy wastewater in Microbial Fuel Cell". *Bioresource Technology*. Vol. 136. P. 407-412, 2013.
58. ElMekawy, A.; Srikanth, S.; Vanbroekhoven, K.; De Wever, H.; Pant, D. "Bioelectro-catalytic valorization of dark fermentation effluents by acetate oxidizing bacteria in bioelectrochemical systems (BES)". *Journal of Power Sources*. Vol. 262. P. 183-191. 2014.
59. ElMekawy, A.; Srikanth, S.; Bajracharya, S.; Hegab, H.; Singh Nigam, P.; Singh, A.; Mohan, S.; Pant, D. "Food and agricultural wastes as substrates for bioelectrochemical system (BES): The synchronized recovery of sustainable energy and waste treatment". *Food Research International*. Vol. 73. P. 213-225, 2015.
60. Fan, Y.; Hu, H.; Liu, H. "Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration". *Journal of Power Sources*. Vol. 171. P. 348-354, 2007.
61. Fan, Y.; Sharbrough, E.; Liu, H. "Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 42. P. 8101-8107, 2008.
62. Fan, Y.; Han, S.; Liu, H. "Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size". *Energy and Environmental Science*. Vol. 5. P. 8273-8280, 2012.
63. Feng, Y.; Wang, X.; Logan, B.; Lee, H.; "Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells". *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 78. P. 873-880, 2008.
64. Feng, Y.; Yang, Q.; Wang, X.; Liu, Y.; Lee, H.; Ren, N. "Treatment of biodiesel production wastes with simultaneous electricity generation using a single-chamber microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 102. P. 411-415, 2011.
65. Franks, A.; Nevin, K. "Microbial fuel cells, a current review". *Energies*. Vol. 3. P. 899-919, 2010.
66. Freguia, S.; Rabaey, K.; Yuan, Z.; Keller, J. "Non-catalyzed cathodic oxygen reduction at graphite granules in microbial fuel cells". *Electrochimica Acta*. Vol. 53. P.598-603, 2007.
67. Fornero, J.; Rosenbaum, M.; Angenent, L. "Electric power generation from municipal, food, and animal wastewaters using microbial fuel cells". *Electroanalysis*. Vol. 22. P. 832-843, 2010.
68. Ganesh, K.; Jambeck, J. "Treatment of landfill leachate using microbial fuel cells: Alternative anodes and semi-continuous operation". *Bioresource Technology*. Vol. 139. P. 383-387, 2013.
69. Gálvez, A.; Greenman, J.; Ieropoulos, I. "Landfill leachate treatment with microbial fuel cells; scale-up through plurality". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 5132-5139, 2009.

70. Ghangrekar, M.; Shinde, V. "Wastewater treatment in microbial fuel cell and electricity generation: a sustainable approach". 12th International Sustainable Development Research Conference. P. 1-9, 2009.
71. Ghangrekar, M.; Shinde, V. "Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production". *Bioresource Technology*. Vol. 98. P. 2879-2885, 2007.
72. Guo, F.; Fu, G.; Zhang, Z.; Zhang, C. "Mustard tuber wastewater treatment and simultaneous electricity generation using microbial fuel cells". *Bioresource Technology*. P. 136. Vol. 425-430, 2013.
73. Ha, S.; Bae, S.; Park, S. "Web mining for distance education". *International Conference on Management and Information Technology*. Vol. 21. P. 715-719, 2000.
74. Habermann, W.; Pommer, E. "Biological fuel cells with sulphide storage capacity". *Applied Microbiology Biotechnology*. Vol. 35. P. 128-133, 1991.
75. Happle, J.; Jordan, D. "Chemical process economics". Marcel Dekker, Ed. 2, 1975.
76. Harnisch, F.; Schröder, U.; Scholz, F. "The suitability of monopolar and bipolar ion exchange membranes as separators for biological fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 42. P. 1740-1746, 2008.
77. Hernández-Fernández, F.; Pérez de los Ríos, A.; Salar-García, M.; Ortiz-Martínez, V.; Lozano-Blanco, L.; Godínez, C.; Tomás-Alonso, F.; Quesada-Medina, J. "Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment". *Fuel Processing Technology*. Vol. 138. P. 284-297, 2015.
78. Holland, A.; Watson, F.; Wilkinson, J. "Introduction to process economics". Wiley. Ed. 2. P. 346-360, 1983.
79. Hu, Z. "Electricity generation by a baffle-chamber membrane less microbial fuel cell". *Journal Power Sources*. Vol. 179. P. 27-33, 2008.
80. Huang, L.; Zeng, R.; Angelidaki, I. "Electricity production from xylose using a mediator-less microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 99. P. 4178-4184, 2008a.
81. Huang, L.; Angelidaki, I. "Effect of humic acids on electricity generation integrated with xylose degradation in microbial fuel cells". *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 100. P. 413-422, 2008b.
82. Huang, Y.; Zhen, H.; Mansfeld, F. "Performance of microbial fuel cells with and without nafion solution as cathode binding agent". *Bioelectrochemistry*. Vol. 79. P. 261-264, 2010.
83. Huang, L.; Regan, J.; Quan, X. "Electron transfer mechanisms, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells". *Bioresource Technology*. Vol. 102. P. 316-323, 2011a.
84. Huang, D.; Zhou, S.; Chen, Q.; Zhao, B.; Yuan, Y.; Zhuang, L. "Enhanced anaerobic degradation of organic pollutants in a soil microbial fuel cell". *Chemical Engineering Journal*. Vol. 172. P. 647-53, 2011b.
85. Huggins, M.; Fallgren, P.; Ren, Z. "Energy and performance comparison of microbial fuel cell and conventional aeration treating of wastewater". *Microbial and Biochemical Technology*, Vol. S6. 2013.
86. Jadhav, G.; Ghangrekar, M. "Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 717-723, 2009.
87. Ieropoulos, I.; Melhuish, C.; Greenman, J. "Eco-Bot-II: an artificial agent with a natural metabolism". *Advanced Robotic System*. Vol. 2. P. 295-300, 2005a.
88. Ieropoulos, I.; Greenman, J.; Melhuish, C.; Hart, J. "Comparative study of three types of microbial fuel cell". *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 37. P. 238-245, 2005b.

89. Ieropoulos, I.; Greenman J.; Melhuish, C. "Improved energy output levels from small-scale microbial fuel cells". *Bioelectrochemistry*. Vol. 78. P. 44-50, 2010.
90. Ismail, Z.; Ibrahim, M. "Desalination of oilfield produced water associated with treatment of domestic wastewater and bioelectricity generation in microbial osmotic fuel cell". *Journal of Membrane Science*. Vol. 490. P. 247-255, 2015.
91. Ismail, Z.; Jaeel, A. "Performance of continuous flowing membrane - less microbial fuel cell with a new application of acrylic beads separator". *Desalination and Water Treatment*. Vol. 54. P. 412-421, 2015.
92. Jang, J.; Pham, T.; Chang, I.; Kang, K.; Moon, H.; Cho, K.; Kim, B. "Construction and operation of a novel mediator - and membrane - less microbial fuel cell". *Process Biochemistry*. Vol. 39. P. 1007-1012, 2004.
93. Jelen, F.; Black, J. "Cost and optimization engineering". Mc Graw Hill. P. 538-546, 1978.
94. Kaewkannetra, P.; Chiwes, W.; Chiu, T. "Treatment of cassava mill wastewater and production of electricity through microbial fuel cell technology". *Fuel*. Vol. 90. P. 2746-2750, 2011.
95. Kannan, S.; Somasundaram, K. "A review of outlier prediction techniques in data mining". *Research Journal of Applied Sciences*. Vol. 10. P. 1021-1028, 2015.
96. Kargi, F.; Eker, S. "Electricity generation with simultaneous wastewater treatment by a microbial fuel cell (MFC) with Cu and Cu-Au electrodes". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 82. P. 658-662, 2007.
97. Katuri, K.; Enright, A.; O'Flaherty, V.; Leech, D. "Microbial analysis of anodic biofilm in a microbial fuel cell using slaughterhouse wastewater". *Bioelectrochemistry*. Vol. 87. P. 164-171, 2012.
98. Kelly, P.; He, Z. "Understanding the application niche of microbial fuel cells in a cheese wastewater treatment process". *Bioresource Technology*. Vol. 157. P. 154-160, 2014.
99. Kim, H.; Park, H.; Hyun, M.; Chang, I.; Kim, M.; Kim, B. "A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*". *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 30. P. 145-152, 2002.
100. Kim, J. R.; Dec, J.; Bruns, M.; Logan, B. "Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells". *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 74. P. 2540-2543, 2008.
101. Kim, J.; Premier, G.; Hawkes, F.; Rodríguez, J.; Dinsdale, R.; Guwy, A. "Modular tubular microbial fuel cells for energy recovery during sucrose wastewater treatment at low organic loading rate". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 1190-1198, 2010.
102. Kim, Y.; Logan, B. "Series assembly of microbial desalination cells containing stacked electro dialysis cells for partial or complete seawater desalination". *Environmental Science and Technology*. Vol. 45. P. 5840-5845, 2011.
103. Kiran, V.; Gaur, B. "Microbial fuel cell: technology for harvesting energy from biomass". *Reviews in Chemical Engineering*. Vol. 29. P. 189-203, 2013.
104. Kjeldsen, P.; Barlaz, M.; Rooker, A.; Baun, A.; Ledin, A.; Christensen, T. "Present and long - term composition of MSW landfill leachate: a review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Vol. 32. P. 297-336, 2002.
105. Kumar, R.; Singh, L.; Zularisam, A. "Exoelectrogens: Recent advances in molecular drivers involved in extracellular electron transfer and strategies used to improve it for microbial fuel cell applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 56. P. 1322-1336, 2016.

106. Kumlanghan, A.; Liu, J.; Thavarungkul, P.; Kanatharana, P.; Mattiasson, B. "Microbial fuel cell-based biosensor for fast analysis of biodegradable organic matter". *Biosensors and Bioelectronic*. Vol. 22. P. 2939-2944, 2007.
107. Lang, H. "Simplified approach to preliminary cost estimates". *Chemical Engineering Journal*. P. 1-15, 1948.
108. Lee, H.; Parameswaran, P.; Kato-Marcus, A.; Torres, C.; Rittman, B. "Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates". *Water Research*. Vol. 42. P. 1501-1510, 2008.
109. Li, F.; Sharma, Y.; Lei, Y.; Li, B.; Zhou, Q. "Microbial fuel cells: the effects of configurations, electrolyte solutions, and electrode materials on power generation". *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol. 160. P. 168-181, 2010.
110. Li, W.; Shen, G.; Liu X.; Yu, H. "Recent advances in the separators for microbial fuel cells", *Bioresource Technology*. Vol. 102. P. 244-252, 2011.
111. Li, X.; Cheng, K.; Selvam, A.; Wong, J. "Bioelectricity production from acidic food waste leachate using microbial fuel cells: Effect of microbial inocula". *Process Biochemistry*. Vol. 48. P. 283-288, 2013a.
112. Li, W.; Sheng, G.; Yu, H. "Chapter 14: Electricity Generation from food industry wastewater using microbial fuel cell technology ". London, UK. Elsevier Academic Press. C.14. P. 249-261, 2013b.
113. Liang, P.; Huang, X.; Fan, M.; Cao, X.; Wang, C. "Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells". *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 77. P. 551-558, 2007.
114. Liang, P.; Fan, M.; Cao, X.; Huang, X. "Evaluation of applied cathode potential to enhance biocathode in microbial fuel cells". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 84. P. 794-799, 2009.
115. Liang, P.; Wu, W.; Wei, J.; Yuan, L.; Xia, X.; Huang, X. "Alternate charging and discharging of capacitor to enhance the electron production of bioelectrochemical systems". *Environmental Science and Technology*. Vol. 45. P. 6647-6653, 2011.
116. Liao, S.; Chu, P.; Hsiao, P. "Data mining techniques and applications - A decade review from 2000 to 2011". *Expert Systems with Applications*. Vol. 39. P. 11303-11311, 2012.
117. Lin, H.; Rabaey, K.; Keller, J.; Yuan, Z.; Pikaar, I. "Scaling-free electrochemical production of caustic and oxygen for sulfide control in sewers". *Environmental Science and Technology*. Vol. 49. P. 11395-11402, 2015.
118. Liu, H.; Logan, B. "Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane". *Environmental Science and Technology*. Vol. 38. P. 4040-4046, 2004.
119. Liu, H.; Ramnarayanan, R.; Logan, B. "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell". *Environmental Science and Technology*. Vol. 38. P. 2281-2285, 2004.
120. Liu, H.; Cheng, S.; Logan, B. "Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell". *Environmental Science and Technology*. Vol. 39. P.658-662, 2005a.
121. Liu, H.; Cheng, S.; Logan, B. "Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration". *Environmental Science and Technology*. Vol. 39. P. 5488-5493, 2005b.
122. Liu, H.; Cheng, S.; Huang, L.; Logan, B. "Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells". *Journal of Power Sources*. Vol. 179 P. 274-279, 2008.

123. Liu, Z.; Liu, J.; Zhang, S.; Su, Z. "Study of operational performance and electrical response on mediator-less microbial fuel cells fed with carbon- and protein-rich substrates". *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 45. P. 185-191, 2009.
124. Liu, B.; Weinstein, A.; Kolln, M.; Garrett, C.; Wang, L.; Bagtzoglou, A.; Karra, U.; Li, Y.; Li, B. "Distributed multiple-anodes benthic microbial fuel cell as reliable power source for subsea sensors". *Journal Power Sources*. Vol. 286. P. 210-216, 2015.
125. Lobato, J.; Cañizares, P.; Rodrigo, M.; Horcajada, L.; Fernández, F.; González del Campo, A.; Trapero, J. "Estudio de viabilidad económica de la implantación de bioceldas en una planta de tratamiento de aguas residuales". *Afinidad LXXI*. P. 192-201, 2014.
126. Logan, B. "Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation". *Water Science and Technology*. Vol. 52. P. 31-37, 2005.
127. Logan, B.; Murano, C.; Scott, K.; Gray, N.; Head, I. "Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell". *Water Research*. Vol. 39. P. 942-952, 2005.
128. Logan, B.; Regan, J. "Microbial fuel cells - Challenges and applications". *Environmental Science and Technology*. Vol. 42. P. 5172-5180, 2006.
129. Logan, B.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schröder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Rabaey, K. "Microbial fuel cells: methodology and technology". *Environmental Science and Technology*, Vol. 40. P. 5181-5192, 2006.
130. Logan, B.; Cheng, S.; Watson, V.; Stadt, G. "Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*, Vol. 41. P. 3341-3346, 2007.
131. Logan, B. "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells". *Nature Reviews Microbiology*. Vol. 7. P. 375-381, 2009.
132. Logan, B.; Wallack, M.; Kim, K.; He, W.; Feng, Y.; Saikaly, P. "Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities". *Environmental Science and Technology Letters*. Vol. 2. P. 206-214, 2015.
133. Lorenzo, M.; Scott, K.; Curtis, T.; Katuri, K.; Head, I. "Continuous feed microbial fuel cell using an air cathode and a disc anode stack for wastewater treatment". *Energy Fuels*. Vol. 23. P. 5707-5716, 2009.
134. Lovley, D. "Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches". *Current Opinion in Biotechnology*. Vol. 17. P. 327-332, 2006.
135. Lu, N.; Zhou, S.; Zhuang, L.; Zhang, J.; Ni, J. "Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology". *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 43. P. 246-251, 2009.
136. Luo, H.; Liu, G.; Zhang, R.; Jin, S. "Phenol degradation in microbial fuel cells". *Chemical Engineering Journal*. Vol. 147. P. 259-264, 2009.
137. Luo, Y.; Zhang, R.; Liu, G.; Li, J.; Li, M.; Zhang, C. "Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 176. P. 759-764, 2010.
138. Luo, X.; Zhang, F.; Liu, J.; Zhang, X.; Huang, X.; Logan, B. "Methane production in microbial reverse-electrodialysis methanogenesis cells (MRMCs) using thermolytic solutions". *Environmental Science and Technology*. Vol. 48. P. 8911-8918, 2014.
139. Mahmoud, M.; Gad-Allah, T.; El-Khatib, K.; El-Gohary, F. "Power generation using spinel manganese-cobalt oxide as a cathode catalyst for microbial fuel cell applications". *Bioresource Technology*. Vol. 102. P. 10459-10464, 2011.
140. Malaeb, L.; Katuri, K.; Logan, B.; Maab, H.; Nunes, S.; Saikaly, P. "A hybrid microbial fuel cell membrane bioreactor with a conductive ultrafiltration membrane biocathode

- for wastewater treatment". *Environmental Science and Technology*. Vol. 47. P. 11821-11828, 2013.
141. Mansoorian, H.; Mahvi, A.; Jafari, A.; Amin, M.; Rajabizadeh, A.; Khanjani, N. "Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing". *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 52. P. 352-357, 2013.
 142. Mardanpour, M.; Nasr Esfahany, M.; Behzad, T.; Sedaqatvand, R. "Single chamber microbial fuel cell with spiral anode for dairy wastewater treatment". *Biosensors and Bioelectronics*. Vol. 38. P. 264-269, 2012.
 143. Meza, J. "Matemáticas financieras aplicadas". ECOE Ediciones. Ed. 2 P. 150-163, 2011.
 144. Min, B.; Logan, B. "Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell". *Environmental Science and Technology*. Vol. 38. P. 5809-5814, 2004.
 145. Min, B.; Kim, J.; Oh, S.; Regan, J.; Logan, B. "Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells". *Water Research*. Vol. 39. P. 4961-4968, 2005.
 146. Mohamad, S.; Tasir, Z. "Educational data mining: A review". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 97. P. 320-324, 2013
 147. Mohan, Y.; Kumar, S.; Das, D. "Electricity generation using microbial fuel cells". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 33. P. 423-426, 2008.
 148. Mohapatra, P.; Maity, C.; Rao, S.; Pati, B.; Mondal, K. "Tannase production by *Bacillus licheniformis* KBR6: Optimization of submerged culture conditions by Taguchi DOE methodology". *Food Research International*. Vol. 42. P. 430-435, 2009.
 149. Moon, H.; Chang, I.; Kim, B. "Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 97. P. 621-627, 2006.
 150. Morodo, V.; Pardinás, J.; Gallegos, R.; Alarcón, J.; Tapia, M.; Rodríguez, S. "Certificados de energía limpia y sus consideraciones para promover la inversión". Instituto mexicano para la competitividad A.C. 2015.
 151. Morris, J.; Jin, S.; Crimi, B.; Pruden, A. "Microbial fuel cell in enhancing anaerobic biodegradation of diesel". *Chemical Engineering Journal*. Vol. 146. P. 161-167, 2009.
 152. Nam, J.; Kim, H.; Lim, K.; Shin, H. "Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. S33-S37, 2010.
 153. Nam, J.; Cusick, R.; Kim, Y.; Logan, B. "Hydrogen generation in microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells using a heat-regenerated salt solution". *Environmental Science and Technology*. Vol. 46. P. 5240-5246, 2012.
 154. Nasirahmadi, S.; Safekordi, A. "Whey as a substrate for generation of bioelectricity in microbial fuel cell using *E. coli*". *International Journal of Environmental Science and Technology*. Vol. 8. P. 823-830, 2011.
 155. Nevin, K.; Woodard, T.; Franks, A.; Summers, A.; Lovley, D. "Microbial electrosynthesis: Feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds". *mBio*. Vol. 1. P. e00103-10, 2010.
 156. Niessen, J.; Schröder, U.; Rosenbaum, M.; Scholz, F. "Fluorinated polyanilines as superior materials for electrocatalytic anodes in bacterial fuel cells". *Electrochemistry Communications*. Vol. 6. P. 571-575, 2004.
 157. Oh, S.; Logan, B. "Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells". *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 70. P. 162-169, 2006.

158. Oh, S.; Logan, B. "Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation". *Journal of Power Sources*. Vol. 167, P.11-17, 2007.
159. Oh, S.; Kim, J.; Premier, G.; Lee, T.; Kim, C.; Sloan, W. "Sustainable wastewater treatment: How might microbial fuel cells contribute". *Biotechnology Advances*. Vol. 28. P. 871-881, 2010.
160. Ortiz-Martínez, V.; Salar-García, M.; de los Ríos, A.; Hernández-Fernández, F.; Egea, J.; Lozano, L. "Developments in microbial fuel cell modeling". *Chemical Engineering Journal*. Vol. 271. P. 50-60, 2015.
161. Pant, D.; Adholeya, A. "Development of a novel fungal consortium for the treatment of molasses distillery wastewater". *The Environmentalist*. Vol. 30. P. 178-182, 2010.
162. Pant, D.; Bogaert, G.; Diels, L.; Vanbroekhoven, K. "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 1533-1543, 2010.
163. Pant, D.; Singh, A.; Van Bogaert, G.; Irving Olsen, S.; Singh Nigam, P.; Diels, L.; Vanbroekhoven, K. "Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters". *RSC Advances*. Vol. 2. P. 1248-1263, 2012.
164. Park, H.; Wu, C.; Lin, L. "Coal tar wastewater treatment and electricity production using a membrane-less tubular microbial fuel cell". *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. Vol. 17. P. 654-660, 2012.
165. Patil, S.; Surakasi, V.; Koul, S.; Ijmulwar, S.; Vivek, A.; Shouche, Y.; Kapandis, B. "Electricity generation using chocolate industry waste water and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 5132-5139, 2009a.
166. Patil, S.; Suraski, V.; Koul, S.; Ijmulwar, S.; Vivek, A.; Shouche, Y.; Kapadnis, B. "Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 5132-5139, 2009b.
167. Potter, M. "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds". *Proceedings of the Royal Society*. Vol. 84. P. 260-276, 1911.
168. Rabaey, K.; Lissens, G.; Siciliano, S.; Verstraete, W. "A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency". *Biotechnology Letters*. Vol. 25. P. 1531-1535, 2003.
169. Rabaey, K.; Clauwaert, P.; Aelterman, P.; Verstraete, W. "Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation". *Environmental Science and Technology*. Vol. 39. P. 8077-8082, 2005.
170. Rabaey, K.; Angenent, L.; Schroder, U.; Keller, J. "Bioelectrochemical systems: From extracellular electron transfer to biotechnological application". IWA Publishing. Ed. 1. 2009.
171. Rabaey, K.; Rozendal, R. "Microbial electrosynthesis-revisiting the electrical route for microbial production". *Nature Reviews Microbiology*. Vol. 8. P. 706-16, 2010.
172. Rabaey, K.; Verstraete, W. "Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation". *Trends Biotechnology*. Vol. 23. P. 291-298, 2010.
173. Rahimnejad, M.; Ghoreyshi, A.; Najafpour, G.; Younesi, H.; Shakeri, M. "A novel microbial fuel cell stack for continuous production of clean energy". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 37. P. 5992-6000, 2012.
174. Rao, R.; Kumar, C.; Prakasham, R.; Hobbs, P. "The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal". *Biotechnology Journal*. Vol. 3. P. 510-523, 2008.

175. Rezaei, F.; Xing, D.; Wagner, R.; Regan, J.; Richard, T.; Logan, B. "Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell". *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 75. P. 3673-3678, 2009.
176. Reimers, C.; Tender, L.; Fertig, S.; Wang, W. "Harvesting energy from the marine sediment-water interface". *Environmental Science and Technology*. Vol. 35. P. 192-195, 2001.
177. Ren, Z.; Ward, T.; Regan, J. "Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture". *Environmental Science and Technology*. Vol. 41. P. 4781-4786, 2007.
178. Ren, H.; Lee, H.; Chae, J. "Miniaturizing microbial fuel cells for potential portable power sources: promises and challenges". *Microfluid Nanofluid*. Vol. 13. P. 353-381, 2012.
179. Ren, Z. "Chapter 19: the principle and applications of bioelectrochemical systems". In: Gupta, V.; Tuohy, M. *Biofuel Technologies*, Springer. P. 501-527, 2013.
180. Revelo, D.; Hurtado, N.; Ruiz, J. "Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica". *Información Tecnológica*. Vol. 24. P. 17-28, 2013.
181. Richter, H.; McCarthy, K.; Nevin, K.; Johnson, J.; Rotello, V.; Lovley, R. "Electricity generation by *Geobacter sulfurreducens* attached to gold electrodes". *American Chemical Society*. Vol. 24. P. 4376-4379, 2008.
182. Rodrigo, M.; Cañizares, P.; Lobato, J.; Paz, R.; Sáez, C.; Linares, J. "Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell". *Journal of Power Source*. Vol. 169. P. 198-204, 2007.
183. Romero, C.; Ventura, S. "Educational data mining: a review of the state of the art". *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*. Vol. 40. P. 601-618, 2010.
184. Rozendal, R.; Hamelers, H.; Molenkamp, R.; Buisman, C. "Performance of single chamber biocatalyzed electrolysis with different types of ion exchange membranes". *Water Research*. Vol. 41. P. 1984-1994, 2007.
185. Rozendal, R.; Hamelers, H.; Rabaey, K.; Keller, J.; Buisman, C. "Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment". *Trends in Biotechnology*. Vol. 26. P. 450-459, 2008a.
186. Rozendal, R.; Jeremiasse, A.; Hamelers, H.; Buisman, C. "Hydrogen production with a microbial biocathode". *Environmental Science and Technology*. Vol. 42. P. 629-634, 2008b.
187. Scott, K.; Murano, C.; Rumbu, G. "A tubular microbial fuel cell". *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 37. P. 1063-1068, 2007.
188. Scott, K.; Cotlarciuc, I.; Head, I.; Katuri, K.; Hall, D.; Lakeman, J.; Browning, D. "Fuel cell power generation from marine sediments, investigation of cathode materials". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol. 83. P. 1244-1254, 2008.
189. Shantaram, A.; Beyenal, H.; Veluchamy, R.; Lewandowski, Z. "Wireless sensors powered by microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 39. P. 5037-5042, 2005.
190. Sharma, V.; Kundu, P. "Biocatalysts in microbial fuel cells". *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 47. P. 179-188, 2010.
191. Sharma, Y.; Li, B. "Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC)". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 35. P. 3789-3797, 2010.
192. Shimoyama, T.; Komukai, S.; Yamazawa, A.; Ueno, Y.; Logan, B.; Watanabe, K. "Electricity generation from model organic wastewater in a cassette-electrode microbial fuel cell". *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 80. P. 325-330, 2008.

193. Sikorski, J.; Brownbridge, G.; Garud, S.; Mosbach, S.; Karimi, I.; Kraft, M. "Parameterisation of a biodiesel plant process flow sheet model". *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 95. P. 108-102.
194. Snider, R.; Strycharz-Glaven, S.; Tsoi, S.; Erickson, J.; Tender, L. "Long-range electron transport in *Geobacter sulfurreducens* biofilms is redox gradient-driven". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 109. P. 15467-15472, 2012.
195. Strik, D.; Timmers, R.; Helder, M.; Steinbusch, K.; Hamelers, H.; Buisman, C. "Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms". *Trends in Biotechnology*. Vol. 29. P. 41-49, 2011.
196. Su, L.; Jia, W.; Hou, C.; Lei, Y. "Microbial biosensors: a review". *Biosensors and Bioelectronics*. Vol. 26. P. 1788-1799, 2011.
197. Sun, J.; Zhao, H.; Yang, Q.; Song, J.; Xue, A. "A novel layer-by-layer self-assembled carbon nanotube-based anode, preparation, characterization, and application in microbial fuel cell". *Electrochimica Acta*. Vol. 55. P. 3041-3047, 2010.
198. Thung, W.; Ong, S.; Ho, L.; Wong, Y.; Oon, Y.; Oon, Y.; Lehl, H. "Simultaneous wastewater treatment and power generation with innovative design of an up flow membrane-less microbial fuel cell". *Water Air Soil Pollut.* P. 226: 165, 2015.
199. Tiryaki, S.; Hamzacebi, C.; Malkocoglu, A. "Evaluation of process parameters for lower surface roughness in wood machining by using Taguchi design methodology". *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 73. P. 537-545, 2015.
200. Tremblay, P.; Zhang, T. "Electrifying microbes for the production of chemicals". *Frontiers in Microbiology*. Vol. 6. P. 1-10, 2015.
201. Tront, J.; Fortner, J.; Plötze, M.; Hughes, J.; Puzrin, A. "Microbial fuel cell biosensor for in situ assessment of microbial activity". *Biosensors and Bioelectronic*. Vol. 24. P. 586-590, 2008.
202. Valle - Riestra, J. "Project evaluation in the chemical process industries". McGraw-Hill. P. 64-65, 1983.
203. Velez, I. "Decisiones de inversión: inversiones y presupuesto de capital". Pontificia Universidad Javeriana Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. P. 106-148. 2004.
204. Venkata Mohan, S.; Mohanakrishna, G.; Reddy, B.; Saravanan, R.; Sarma, P.; "Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediator less (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment". *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 39. P. 121-130, 2008a.
205. Venkata Mohan, S.; Saravanan, R.; Veer Raghavulu, S.; Mohanakrishna, G.; Sarma, P. "Bioelectricity production from wastewater treatment in dual chambered microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched mixed microflora: effect of catholyte". *Bioresource Technology*. Vol. 99. P. 596-603, 2008b.
206. Venkata Mohan, S.; Mohanakrishna, G.; Sarma, P. "Composite vegetable waste as renewable resource for bioelectricity generation through non-catalyzed open - air cathode microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 101. P. 970-976, 2010.
207. Vourch, M.; Balannec, B.; Chaufer, B.; Dorange, G. "Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse". *Desalination*. Vol. 219. P. 190-202, 2008.
208. Wang, X.; Feng, Y.; Lee, H. "Electricity production from beer brewery wastewater using single chamber microbial fuel cell". *Water Science and Technology*. Vol. 57. P. 1117-1121, 2008a.
209. Wang, A.; Ren, N.; Wang, X.; Lee, D. "Enhanced sulfate reduction with acidogenic sulfate-reducing bacteria". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 154. P. 1060-1065, 2008b.

210. Wang, X.; Cheng, S.; Feng, Y.; Merrill, M.; Saito, T.; Logan, B. "Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 43. P. 6870-6874, 2009a.
211. Wang, X.; Feng, Y.; Wang, H.; Qu, Y.; Yu, Y.; Ren, N.; Li, N.; Wang, E.; Lee, H.; Logan, B. "Bioaugmentation for electricity generation from corn stover biomass using microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 43. P. 6088–6093, 2009b.
212. Wang, C.; Chen, W.; Huang, R. "Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 35. P. 7217-7223, 2010.
213. Wang, H.; Ren, Z. "A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology". *Biotechnology Advances*. Vol. 31. P. 1796-1807, 2013
214. Watanabe, K. "Recent developments in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy". *Journal of Bioscience and Bioengineering*. Vol. 106. P. 528-536, 2008.
215. Wei, J.; Liang P.; Huang X. "Recent progress in electrodes for microbial fuel cells". *Bioresource Technology*. Vol. 102. P.9335-9344, 2011.
216. Wen, Q.; Wu, Y.; Cao, D.; Zhao, L.; Sun, Q. "Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater". *Bioresource Technology*. Vol. 100. P. 4171-4175, 2009.
217. Wen, Q.; Wu, Y.; Zhao, L.; Sun, Q. "Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell". *Fuel*. Vol. 89. P. 138-1385, 2010.
218. Wu, Y.; Wu, A. "Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi". *Bravo J. Díaz de Santos, España*. P. 239-271, 1997.
219. Xiao, L.; Young, E.; Berges, J.; He, Z. "Integrated photo-bioelectrochemical system for contaminants removal and bioenergy production". *Environmental Science and Technology*. Vol. 46. P.11459-11466, 2012.
220. Xiao, B.; Yang, F.; Liu, J. "Evaluation of electricity production from alkaline pretreated sludge using two-chamber microbial fuel cell". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 254. P. 57-63, 2013.
221. Xie, S.; Liang, P.; Chen, Y.; Xia, X.; Huang, X. "Simultaneous carbon and nitrogen removal using anoxic/anoxic - biocathode microbial fuel cells coupled system". *Bioresource Technology*. Vol. 102. P. 348-354, 2011.
222. Yang, F.; Ren, L.; Pu, Y.; Logan, B. "Electricity generation from fermented primary sludge using single-chamber air - cathode microbial fuel cells". *Bioresource Technology*. Vol. 128. P.784-787, 2013.
223. Yong, Y.; Yu, Y.; Yang, Y.; Li, C.; Jiang, R.; Wang, X.; Wang, J.; Song, H. "Increasing intracellular releasable electrons dramatically enhances bioelectricity output in microbial fuel cells". *Electrochemistry Communications*. Vol. 19. P. 13-16, 2012.
224. Yu, E.; Cheng, S.; Scott, K.; Logan, B. "Microbial fuel cell performance with non-Pt cathode catalysts". *Journal of Power Sources*. Vol. 171. P. 275-281, 2007.
225. Yuan, Y.; Zhou, S.; Zhuang, L. "Polypyrrole/carbon black composite as a novel oxygen reduction catalyst for microbial fuel cells". *Journal of Power Sources*. Vol. 195. P. 3490-3493, 2010.
226. Zhang, Y.; Min, B.; Huang, L.; Angelidaki, Y. "Generation of electricity and analysis of microbial communities in wheat straw biomass-powered microbial fuel cells". *Applied and environmental microbiology*. Vol. 75. P. 3389-3395, 2009.
227. Zhang, F.; Saito, T.; Cheng, S.; Hickner, M.; Logan, B. "Microbial fuel cell cathodes with poly (dimethylsiloxane) diffusion layers constructed around stainless steel mesh current collectors". *Environmental Science and Technology*. Vol. 44. P. 1490-1495, 2010.

228. Zhang, Y.; Angelidaki, I. "Submersible microbial fuel cell sensor for monitoring microbial activity and BOD in groundwater: focusing on impact of anodic biofilm on sensor applicability". *Biosensors and Bioelectronic*. Vol. 108. P. 2339-2347, 2011.
229. Zhang, F.; Ge, Z.; Grimaud, J.; Hurst, J.; He, Z. "Long-term performance of liter scale microbial fuel cells treating primary effluent installed in a municipal wastewater treatment facility". *Environmental Science and Technology*. Vol. 47. P. 4941-4948, 2013a.
230. Zhang, X.; Zhu, F.; Chen, L.; Zhao, Q.; Tao, G. "Removal of ammonia nitrogen from wastewater using an aerobic cathode microbial fuel cell". *Bioresource Technology*. Vol. 146. P. 161-168, 2013b.
231. Zhang, F.; Ahn, Y.; Logan, B. "Treating refinery wastewaters in microbial fuel cells using separator electrode assembly or spaced electrode configurations". *Bioresource Technology*. Vol. 152. P. 46-52, 2014.
232. Zhang, Z.; Kusiak, A.; Zeng, Y.; Wei, Z. "Modeling and optimization of a wastewater pump system with data-mining methods". *Applied Energy*. Vol. 164. P. 303-311, 2016.
233. Zhao F.; Harnisch, F.; Schröder, U.; Scholz, F.; Bogdanof, P.; Herrmann, I. "Application of pyrolysed iron(II) phthalocyanine and CoTMPP based oxygen reduction catalysts as cathode materials in microbial fuel cells". *Electrochemistry Communications*. Vol. 7. P. 1405-1410, 2005.
234. Zhao, F.; Rahunen, N.; Varcoe, J.; Chandra, A.; Avignone-Rossa, C.; Thumser, A.; Slade, R. "Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell". *Environmental Science and Technology*. Vol. 42. P. 4971-4976, 2008.
235. Zhou, M.; Chi, M.; Luo, J.; He, H.; Jin, T. "An overview of electrode materials in microbial fuel cells". *Journal of Power Sources*. Vol. 196. P. 4427-4435, 2011.
236. Zhu, X.; Hatzell, M.; Cusick, R.; Logan, B. "Microbial reverse-electrodialysis chemical-production cell for acid and alkali production". *Electrochemistry Communications*. Vol. 31. P. 52-55, 2013.
237. Zhu, X.; Hatzell, M.; Logan, B. "Microbial reverse electrodialysis electrolysis and chemical-production cell for H₂ Production and CO₂ sequestration". *Environmental Science and Technology Letters*. Vol. 1. P. 231-235, 2014.
238. Zhu, X.; Logan, B. "Microbial electrolysis desalination and chemical-production cell for CO₂ sequestration". *Bioresource Technology*. Vol. 159. P. 24-29, 2014.
239. Zhuang, L.; Feng, C.; Zhou, S.; Li, Y.; Wang, Y. "Comparison of membrane - and cloth - cathode assembly for scalable microbial fuel cells: Construction, performance and cost". *Process Biochemistry*. Vol. 45. P. 929-934, 2010.
240. Zhuang, L.; Yuan, Y.; Wang, Y.; Zhou, S. "Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater". *Bioresource Technology*, Vol. 123. P. 406-412, 2012a.
241. Zhuang, L.; Zheng, Y.; Zhou, S.; Yuan, Y.; Yuan, H.; Chen, Y. "Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment". *Bioresource Technology*. Vol. 106. P. 82-88, 2012b.
242. Zhuwei, D.; Li, H.; Gu, T. "A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy". *Biotechnology Advances*. Vol. 25. P. 464-482, 2007.
243. Zuo, Y.; Maness, P.; Logan, B. "Electricity production from steam-exploded corn stover biomass". *Energy Fuel*. Vol. 20. P.1716-1721, 2006.
244. Zuo, Y.; Cheng, S.; Call, D.; Logan, B. "Tubular membrane cathodes for scalable power generation in microbial fuel cells". *Environmental Science and Technology*. Vol. 41. P. 3347-3353, 2007.

13 ANEXOS

13.1 Anexo 1

CELDA	INÓCULO	ÁNODO	CÁTODO	MEMBRANA	VOLUMEN (ml)	DP (mW/m ²)	EC (%)	REMOCIÓN DQO (%)	AUTOR	FECHA
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	BARRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	N/A	388	9	12	70	LIU ET AL.	2004
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	28	28	28	55	LIU Y LOGAN	2004
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	28	146	20	75	LIU Y LOGAN	2004
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	MIP NAFION 117	22	72	14	42	MIN Y LOGAN	2004
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	MIP NAFION 117	22	43	65	79	MIN Y LOGAN	2004
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	MIP NAFION 117	250	38	47	-	MIN ET AL.	2005
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	MIP NAFION 117	250	45	55	92	MIN ET AL.	2005
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	182	261	8	88	MIN ET AL.	2005

CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR PLATINO Y NAFION	N/A	35	464	27	46	CHENG ET AL.	2006
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/PLATINO/POLITETRAFLUOROETILENO	N/A	28	766	32	-	CHENG ET AL.	2006
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A		6.73	-	81.89	GHAGREKAR ET AL.	2006
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	28	80	5.2	54	HEILMANN Y LOGAN	2006
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE GRAFITO	FIELTRO DE GRAFITO/PLATINO	N/A	20	560	-	-	MOON ET AL.	2006
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	AMI-7001	14	290	97	-	CHENG ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/PLATINO/POLITETRAFLUOROETILENO	N/A	28	1250	-	-	FAN ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A	10598	10.9	-	88	GHAGREKAR ET AL.	2007
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	CABLES DE COBRE	CABLES DE COBRE Y ORO	PUENTE SALINO	1440	2.9	-	80	KARGI ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	320	1070	-	-	LOGAN ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	320	1430	23	-	LOGAN ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	320	600	-	-	LOGAN ET AL.	2007

CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A	1000	25	-	50	RODRIGO ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO	N/A		30	-	-	SCOTT ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	CILINDRO DE GRAFITO/CO-TETRA-METHYL phenylporphyrin	N/A	32	403	33	-	ZUO ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	CILINDRO DE GRAFITO/CO-TETRA-METHYL phenylporphyrin	N/A	23	306	40	-	ZUO ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN	N/A	23	101	22	-	ZUO ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZAD OR PLATINO	N/A	28	394	19	-	ZUO ET AL.	2007
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN	MIP NAFION 117	350	640	59.8	65	ALZATE ET AL.	2008
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE GRAFITO	FIELTRO DE GRAFITO	MIP ULTREX CMI 7000		2650	-	-	CAO ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/PLATINO/P OLITETRAFLUOROETI LENO	N/A	12	6860	-	-	FAN ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/PLATINO/P OLITETRAFLUOROETI LENO	N/A	28	205	10	87	FENG ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	PAPEL CARBÓN/CATALIZAD OR PLATINO	N/A	300	501	16	76	HUANG AND LOGAN	2008
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MIP NAFION 117	1310	56.87	6.1	85	JADHAV ET AL.	2008

CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR OR PLATINO	N/A	28	228	-	84	KIM ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	NAFION	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR OR PLATINO	N/A	1500	164	-	88	LI ET AL.	2008
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL DE GRAFITO	MIP NAFION 117	200	1600	12	86	LI ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR OR PLATINO/NAFION	N/A	550	218	7	-	MIN ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	483	38	79	WANG ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CARBÓN VITREO	CARBÓN VITREO	N/A	59000	70	59	94	ALDROVAN DI ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	MIP NAFION 424	404	8	-	-	AN ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MIP NAFION 117	2310	158	1.63	47.8	BEHERA Y GHANGREK AR	2009
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MIP NAFION 117	2310	600	5.67	40.4	BEHERA Y GHANGREK AR	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO	N/A	16	0.979	-	10	DANIEL ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBÓN	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	320	210	16	25	HUANG ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	1310	17.1	5	90	JADHAV AND GHANGREK AR	2009
CÁMARA	AGUA	CABLES DE	CABLES DE COBRE Y	N/A	756	40	-	45	KARGI ET	2009

SENCILLA	RESIDUAL	COBRE	ORO						AL.	
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	MIP NAFION 117	300	2239	8	98	LU ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	PUENTE SALINO	900	31	-	82	MORRIS ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	800	1500	-	75	PATIL ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	750	65.82	-	61.51	RAGHAVULU ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	900	11	-	90	RODRIGO ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	1000	373	-	92	SUN ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO/NAFION 117	N/A	1500	156	57.99	66.67	VENKATA ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	BARRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	180	264	19.75	43	WEN ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A	2200	1410	-	53.2	ZHANG ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN	MIP NAFION 117	600	123	37.1	-	ZHANG ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	334.2	47	88	AHN Y LOGAN	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	GRAFITO GRANULAR	DIOXIDO DE PLOMO	N/A	2360	41.8	-	96.5	CHENG ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	500	124.35	-	72.84	MOHANAK RISHNA ET AL.	2010
CÁMARA	LODO	TELA DE	TELA DE CARBONO	MIP NAFION	250	2981	-	93	NAM ET AL.	2010

SENCILLA	ANAEROBIO	CARBONO		117						
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO/NAFION 117	N/A	550	57	-	62.86	VENKATA ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO/NAFION 118	N/A	550	36	7.5	95.49	VENKATA ET AL.	2010
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	MIP NAFION 117	100	7.5	-	95.7	WEN ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	RED DE ACERO INOXIDABLE/CATALIZADOR DE CARBON ACTIVADO/POLITETRAFLUOROETILENO	N/A	180	669	7.61	44	WEN ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/PLATINO/POLITETRAFLUOROETILENO	N/A	12	576	-	-	YUAN ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/PLATINO/POLITETRAFLUOROETILENO	N/A	12	337	-	-	YUAN ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/POLIPIRROL	N/A	12	402	-	-	YUAN ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CEPILLO FIBRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	1850	215	5.2	-	ZHENG ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO	N/A	170	96	28	-	ZHUANG ET AL.	2010
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	VARILLA DE GRAFITO	PUENTE SALINO	12585	18	-	64	ANUPAMA ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	MIP NAFION 117	500	164	-	-	CHOI ET AL.	2011

CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR OR PLATINO	N/A	250	240	-	-	CHOI ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL FIBRA DE CARBÓN	MIP NAFION 117	9190	124	-	90	HUANG ET AL.	2011
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	778	10.4	90	FENG ET AL.	2011
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	1310	18.7	90	FENG ET AL.	2011
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN		N/A	30000	1771	20	28	KAEWKAN NETRA ET AL.	2011
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	320	91	-	-	LIU ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	3000	123.8	-	98.9	SANGHETTA ET AL.	2011
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	690	116	-	70	ZHONG ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	CEPILLO FIBRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO CON CAPA DE DIFUSION DE GAS	AMI-7001	112	4250	-	-	CHOI ET AL.	2012
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	PLATINO	MIP ULTREX CMI 7000	64	199.7	-	-	FENG ET AL.	2012
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	CARBÓN/ NITRÓGENO DOPADO	MIP ULTREX CMI 7000	64	222.5	-	-	FENG ET AL.	2012

CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	FIELTRO DE GRAFITO	MIP NAFION 424	40	1000	89	76	HA ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	70	2300	47	91	ICHIHASCHI ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	350	13	25	86	ISHII ET AL.	2012
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	MALLA DE TITANIO PLATINADO	MIP NAFION 117	250	578	64	-	KATURI ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	900	300	20.9	-	LOBATO ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO CON CAPA DE DIFUSION DE GAS	N/A		1.5	2.5	-	NIMJE ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO CON CAPA DE DIFUSION DE GAS	N/A		1.3	2.7	-	NIMJE ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO CON CAPA DE DIFUSION DE GAS	N/A		1.3	2.9	-	NIMJE ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	N/A	600	4.5	-	88	PARK ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	130	268	-	-	SANTORO ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	1200	406.38	-	-	SRIKANTH ET AL.	2012
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	720	15.2	-	-	SRIKANTH ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	5700	754	12	80	YU ET AL.	2012

CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	5700	149	5	65	YU ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/ÓXIDO DE MANGANESO COMO CATALIZADOR	N/A	295	175.7	-	83.8	ZHUANG ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	10000	97.2	7.6	-	ZHUANG ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	604	-	-	AHN ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	1048	-	-	AHN ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	130	120	-	-	AHN ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	VARILLA DE GRAFITO	N/A	10000	18.35	-	45.4	ANUPAMA ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	MIP NAFION 117	450	45	0.8	45	BARANITH ARAN ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO CON POLIACRILONITRILO	FIELTRO DE CARBONO CON POLIACRILONITRILO	MIP NAFION 117	450	22	24	0.8	BARANITH ARAN ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	TELA DE GRAFITO	PAPEL DE GRAFITO	N/A	270	9.2	5.7	80	BUISTRÓN ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	350	161	17.17	90	ELAKKIYA ET AL.	2013

CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR OR PLATINO	MIP NAFION 117	420	106.7	29	76	GHASEMI ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR OR PLATINO	SPEEK	420	77.3	18	88	GHASEMI ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO	PEM STERION		13.5	-	-	GONZALEZ ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO	MIP ULTREX CMI 7000		246	67.7	-	GUO ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	556	27	86.4	JIA ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	MALLA DE CARBONO	MALLA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO/POLITETRAFLUOROETILENO	N/A	14	820	13.3	76.1	JIN ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	BIOCATODO/ NANO TUBOS DE CARBÓN	N/A	40	380	8.5	97.3	MALAEB ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	40	820	47.3	64	MALAEB ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL GRAFITO	HOJAS DE GRAFITO	MIP NAFION 117	1500	230	21	86	MANSOORI AN ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	250	31.8	2.05	74	MARASHI ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE GRAFITO	POLITETRAFLUOROETILENO	PAPEL FILTRO No. 1004-240,	CASSETTE	150	20	80	MIYAHARA ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	FIELTRO DE GRAFITO	FIELTRO DE GRAFITO	MIP NAFION 117	40	85	-	70	NANDY ET AL.	2013

CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBÓN ACTIVADO	TELA DE CARBONO CON CAPA DE DIFUSION DE GAS	N/A	25	382.5	-	59	SEVDA ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	25	320	18	84	YANG ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBÓN ACTIVADO	ESPUMA DE NIQUEL	N/A	14	382	3.23	73.3	YANG ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	MALLA DE CARBONO	TELA DE CARBONO ACTIVADO	N/A	28	1330	-	-	ZHANG ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	125	744	-	52	ZHANG ET AL.	2013
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBON	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	420	13	44	CHOI ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PLATINO	PLATINO	MIP ULTREX CMI 7000	365	7205	-	90	CIRICK ET AL.	2014
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE/NANOTUBOS DE CARBÓN /CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	650	280	-	-	KIM ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	2000	621.13	37.16	90.46	MASOORIAN ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/FALOCIANINA DE HIERO	MIP NAFION 117	200	16.29	-	-	MSHOPERI	2014
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	TELA DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	140	437.13	-	62.5	QUAN ET AL.	2014

CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	28	530	52.48	70	TAO ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE TITANIO RECUBIERTO DE PLATINO	MIP ULTREX CMI 7000	600	87	-	-	TASKAN ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE COBRE	PLACA DE TITANIO RECUBIERTO DE PLATINO	MIP ULTREX CMI 7001	300	271	-	-	TASKAN ET AL.	2014
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	13	280	-	84	ZHANG ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	MIP NAFION 117	5000	16	-	94.1	ZHAO ET AL.	2014
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CEPILLO FIBRA DE CARBÓN	TELA DE CARBONO	N/A	28	769.2	31.6	96	CHOI ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A		17	-	81	ISMAIL ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	250	65.6	-	-	KAMRAM ET AL.	2015
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	STERION	200	150	-	60	RASCHITOR ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CEPILLO FIBRA DE CARBÓN	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	124.6	29	60	SCIARRIA ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	28	560	35	66	TAO ET AL.	2015

CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	MIP NAFION 117	28	528	51	79	TAO ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	N/A	110	6.5	6.09	90.9	THUNG ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	110	44.1	15.95	86.89	THUNG ET AL.	2015
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	ESCAMAS DE CARBONO	N/A	110	44.4	15.32	88.91	THUNG ET AL.	2015

13.2 Anexo 2

CELDA	INÓCULO	ÁNODO	CÁTODO	MEMBRANA	VOLUMEN (ml)	DP (mW/m ²)	EC (%)	REMOCIÓN DQO (%)	AUTOR	FECHA
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	PUENTE SALINO	1000	25	-	50	RODRIGO ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A	10598	10.9	-	88	GHAGREKAR ET AL.	2007
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	CABLES DE COBRE	CABLES DE COBRE Y ORO	PUENTE SALINO	1440	2.9	-	80	KARGI ET AL.	2007
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO/NAFION	N/A	550	218	7	-	MIN ET AL.	2008
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	NAFION	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	1500	164	-	88	LI ET AL.	2008
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MIP NAFION 117	1310	56.87	6.1	85	JADHAV ET AL.	2008
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	800	1500	-	75	PATIL ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	N/A	2200	1410	-	53.2	ZHANG ET AL.	2009

CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MIP NAFION 117	2310	600	5.67	40.4	BEHERA Y GHANGREKAR	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	N/A	1000	373	-	92	SUN ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	MIP NAFION 117	2310	158	1.63	47.8	BEHERA Y GHANGREKAR	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO/NAFION 117	N/A	1500	156	57.99	66.67	VENKATA ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL CARBÓN	MIP NAFION 117	600	123	37.1	-	ZHANG ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CARBÓN VITREO	CARBÓN VITREO	N/A	59000	70	59	94	ALDROVANDI ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	750	65.82	-	61.51	RAGHAVULU ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	CABLES DE COBRE	CABLES DE COBRE Y ORO	N/A	756	40	-	45	KARGI ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	MALLA DE ACERO INOXIDABLE	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	PUENTE SALINO	900	31	-	82	MORRIS ET AL.	2009
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	BARRA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	1310	17.1	5	90	JADHAV AND GHANGREKAR	2009

CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	900	11	-	90	RODRIGO ET AL.	2009
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	CEPILLO FIBRA DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	1850	215	5.2	-	ZHENG ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	500	124.35	-	72.84	MOHANAKRISHNA ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO/NAFION 117	N/A	550	57	-	62.86	VENKATA ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	GRAFITO GRANULAR	DIOXIDO DE PLOMO	N/A	2360	41.8	-	96.5	CHENG ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO/NAFION 117	N/A	550	36	7.5	95.49	VENKATA ET AL.	2010
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	30000	1771	20	28	KAEWKANNETRA ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	PAPEL CARBÓN/CATALIZADOR PLATINO	MIP NAFION 117	500	164	-	-	CHOI ET AL	2011
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PAPEL CARBÓN	PAPEL FIBRA DE CARBÓN	MIP NAFION 117	9190	124	-	90	HUANG ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	3000	123.8	-	98.9	SANGHETTA ET AL.	2011

CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	TELA DE CARBONO/TETRAFLUOROETILENO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	690	116	-	70	ZHONG ET AL.	2011
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	VARILLA DE GRAFITO	PUENTE SALINO	12585	18	-	64	ANUPAMA ET AL.	2011
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	5700	754	12	80	YU ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	1500	406.38	14.98	-	SRIKANTH ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	N/A	900	300	20.9	-	LOBATO ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	5700	149	5	65	YU ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	TELA DE CARBONO	TELA DE CARBONO/CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	10000	97.2	7.6	-	ZHUANG ET AL.	2012
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	720	15.2	-	-	SRIKANTH ET AL.	2012
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	N/A	600	4.5	-	88	PARK ET AL.	2012

CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PAPEL GRAFITO	HOJAS DE GRAFITO	MIP NAFION 117	1500	230	21	86	MANSOORIAN ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	BARRA DE GRAFITO	VARILLA DE GRAFITO	PUENTE SALINO	10000	18.35	-	45.4	ANUPAMA ET AL.	2013
CÁMARA DOBLE	AGUA RESIDUAL	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE GRAFITO	MIP NAFION 117	2000	621.13	37.16	90.46	MASOORIAN ET AL.	2014
CÁMARA SENCILLA	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE GRAFITO	MALLA DE ACERO INOXIDABLE/NANOTUBOS DE CARBÓN /CATALIZADOR DE PLATINO	N/A	650	280	-	-	KIM ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	PLACA DE GRAFITO	PLACA DE TITANIO RECUBIERTO DE PLATINO	MIP ULTREX CMI 7000	600	87	-	-	TASKAN ET AL.	2014
CÁMARA DOBLE	LODO ANAEROBIO	FIELTRO DE CARBONO	FIELTRO DE CARBONO	MIP NAFION 117	5000	16	-	94.1	ZHAO ET AL.	2014

