



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“Obtención de energía eléctrica por medio de una
celda de combustión microbiana empleando plantas
acuáticas”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Mecánico Eléctrico

PRESENTA:

Hilario Contreras Miguel Ángel

Asesora:

Pérez Vera Leydi Rubí

Co-asesor:

Delgadillo Torres Ricardo Alberto

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Contenido

Índice de Figuras 5

Índice de tablas..... 7

Índice de graficas 8

Glosario..... 9

Resumen..... 13

Introducción 14

Capítulo 1. Planteamiento del problema..... 16

 1.1 Planteamiento del problema 16

 1.2 Justificación 19

Capítulo 2. Marco de referencia..... 20

 2.1 Antecedentes..... 20

Capítulo 3. Marco teórico 21

 3.1 Electroquímica..... 21

 3.1.1 Celda electrolítica 22

 3.1.2 Celda galvánica 23

 3.1.3 Celda de combustible 25

 3.2 Celda de combustible microbiana (CCM)..... 27

 3.2.1 Componentes de la celda de combustible microbiana 27

 3.2.2 Transferencia de electrones 28

 3.2.3 Electroodos 30

 3.2.4 Ánodo 31

 3.2.5 Cátodo..... 32

 3.2.6 Grafito..... 32

 3.2.7 Sistema de intercambio de protones 33

 3.2.7.1 Membrana 33

 3.2.7.2 Puente de intercambio..... 35

 3.2.8 Sustratos 36

 3.2.8.1 Agua residual 38

 3.2.8.1.1 Ciclo de aguas residuales 39

 3.2.8.1.2 Características físicas del agua residual..... 40

 3.2.8.1.3 Características químicas 42

 3.2.8.1.4 Características biológicas..... 45



3.2.9 Condiciones de construcción de una CCM	47
3.2.10 Ventajas de una celda de combustible microbiana.....	48
3.2.11 Microorganismos en las CCM's.....	48
3.2.11.1 Microorganismos en la cámara anódica.....	48
3.2.11.2 Microorganismos en la cámara catódica.....	50
3.2.11.3 Bacteria Geobacter.....	50
3.2.12 Generación de energía eléctrica.....	52
3.2.12.1 La ley de Ohm	52
3.2.12.1.1 Potencia	53
3.2.12.1.2 Densidad de potencial (DP)	53
3.2.12.1.4 Eficiencia coulombica (EC)	54
3.2.13 Plantas acuáticas	55
3.2.13.1 Planta acuática elodea canadensis.....	56
3.2.13.2 Microalga Espirulina	57
Capítulo 4. Objetivos.....	65
4.1 Objetivo general	65
4.2 Objetivos particulares.....	65
Capítulo 5. Hipótesis.....	66
Capítulo 6. Metodología	67
6.1 Desarrollo experimental.....	69
6.2 Desarrollo de celdas de combustible microbianas	69
6.3 Construcción de las Celdas de combustible microbianas.....	71
6.4 Análisis de las Celdas de Combustible Microbianas.....	75
6.4.2 Análisis de agua residual	78
6.4.3 Determinación de la prueba de DBO ₅	80
7.1 Preparación de la muestra para DBO	81
7.2 Evaluación de la producción de electricidad	83
8.1 Cultivo de microalgas.....	84
8.2 Nutrición del cultivo	84
8.3 Escalonamiento de cultivo microalgal	84
9.1 Análisis de microorganismos	86
9.2 Aislamiento de bacterias.....	86
9.3 Preparación de placas	87



9.4 Aislamiento de Bacterias por dispersión de superficies	87
Capítulo 7. Resultados.....	91
10.1 Operación del sistema de la celda de combustible microbiana	91
Puesta en marcha de la CCM 1	91
Resultados obtenidos de la CCM 2	94
Resultados de la CCM 3.....	95
Resultados de la CCM 5.....	95
Resultados de la CCM 6.....	95
Comparativa entre la CCM8 y CCM 9.....	96
Celdas destacadas de la primera fase.....	100
Análisis de Agua residual.....	101
Rediseño de la CCM.....	104
11.1 Segunda etapa.....	104
12.1 Tercera etapa.....	107
13. Conclusiones	110
Agradecimiento.....	112
Referencias	113
Apéndices	116



Índice de Figuras

Figura 1. Aplicaciones de las celdas electroquímicas a nivel industrial.	22
Figura 2. Celda electrolítica. Se muestran las partes fundamentales de la celda ánodo, cátodo, batería y electrolito. Imagen tomada de (Ramírez, 2016)	23
Figura 3. Celda galvanica de zinc – cobre (Daniel) con puente salino de cloruro de potasio.....	24
Figura 4. Composición principal de una Celda de combustible microbiana.	27
Figura 5. Bacteria Geobacter,	29
Figura 6. Representación de una Celda de Combustible Microbiana, diferenciando los dos electrodos.	30
Figura 7. Representación gráfica de los enlaces covalentes entre los átomos de carbono en el grafito.....	33
Figura 8. Estructura de la membrana de intercambio protónico, llamada Nafion®	34
Figura 9. Representación del puente salino en una celda galvánica.....	35
Figura 10. Celda microbiana empleando glucosa como sustrato.....	36
Figura 11. Ciclo de manejo de las aguas residuales municipales.....	40
Figura 12. Funcionamiento de una CCM de sedimento.....	51
Figura 13. Vista aérea de diferentes tipos de raceways en Cajamar.....	61
Figura 14. Fotobiorreactor tubular ubicado en Cajamar.....	62
Figura 15. Procesos de producción de energía usando biomasa microalgar.....	63
Figura 16. Etapas del proceso de obtención de biodiesel a partir de microalgas.....	64
Figura 17. Esquema de la metodología.....	67
Figura 18. Proceso de bioelectrogénesis	70
Figura 19. Corte de botella para introducir el puente de intercambio iónico.....	71
Figura 20. Unión de botella con puente de intercambio iónico	72
Figura 21. Electrodo de grafito unidos con alambre de cobre.....	73
Figura 22. Representación final de una CCM.....	73
Figura 23. Planta acuática <i>elodea canadienses</i> utilizada en las CCMs	74
Figura 24. Prototipo general de la celda de combustible microbiana	76
Figura 25. Viales para la prueba de DQO	78
Figura 26. Termorreactor modelo Orion COD165 con viales preparados.....	79
Figura 27. Colorímetro Thermo modelo Orion AQ3700	79
Figura 28. Equipo OxiTop Box, utilizado para obtener los valores de DBO	80



Figura 29. Rangos de volumen en función a la prueba de DBO ₅	80
Figura 30. Probeta con 250 ml de agua residual para la prueba de DBO ₅	81
Figura 31. Preparación lista de muestras, para iniciar la prueba de DBO ₅	82
Figura 32. Multímetro Steren modelo MUL-005	83
Figura 33. Evaluación del voltaje de la CCM, con ayuda de un multímetro.....	83
Figura 34. Días en el cultivo crece y el escalonamiento	85
Figura 35. Cultivo de microalga.	85
Figura 36. Balanza AQT, primer paso para la obtención del agar nutritivo	86
Figura 37. Autoclave utilizada para el procedimiento	87
Figura 38. Método dilución de la muestra en tubo	88
Figura 39. Técnica de disolución y cuenta en placa	89
Figura 40. Sembrado de la dilución en la placa de agar nutritivo.....	89
Figura 41. Sembrado de disolución en caja Petri.....	90
Figura 42. Montaje y análisis de CCM's	96
Figura 43. Imagen tomada desde el microscopio identificando la estructura bacteriana de cada tipo de bacteria.....	103



Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de celda de combustible	26
Tabla 2. Composición típica de un agua residual doméstica (Metcalf-Eddy, 1991)	44
Tabla 3. Valores típicos de los principales contaminantes de las aguas residuales urbanas procedentes de pequeñas aglomeraciones.	44
Tabla 5. Características de construcción de las CCM.....	77
Tabla 6. Monitoreo de voltaje de la CCM 1 en sus primeras dos horas	91
Tabla 7. Resultados de operación de las 9 celdas de combustible microbianas	97
Tabla 8. Resultados del análisis de agua residual	102
Tabla 9. Características de construcción para la CCM de la segunda etapa	105



Índice de graficas

Gráfica 1. Crecimiento de voltaje de la CCM 1 en un lapso de 10 días 92

Gráfica 2. Muestra los resultados finales del desempeño de la CCM 1 93

Gráfica 3. Voltajes obtenidos en la CCM 2 con agua destilada 94

Gráfica 4. del desempeño registrado de la CCM 6 95

Gráfica 5. Se muestran los voltajes correspondientes a cada CCM 96

Gráfica 6. Comparativo del desempeño de la CCM 6 y CCM 8 en un periodo de 20 días
..... 101

Gráfica 7. Comparativo de la generación de voltaje y comportamiento de las dos CCM's
que contienen microalga 105

Gráfica 8. Comparativo de la generación de voltaje y comportamiento de las dos CCM's
que contienen elodea..... 106

Gráfica 9. Representación gráfica de la generación de voltaje de las 15 CCM's conectadas
en serie..... 108



Glosario

Absorbancia: Es un concepto más relacionado con la muestra puesto que nos indica la cantidad de luz absorbida por la misma

Agar: Es un solidificante que se utiliza en la mayoría de los medios de cultivo ya que además no tiene valor nutritivo para los microorganismos.

Agente catalítico: Es una sustancia que provoca que una reacción química se produzca más rápidamente en una dirección preferida.

Autótrofos: Es un organismo que produce compuestos orgánicos complejos (como carbohidratos, grasas y proteínas) usando carbono de sustancias simples como dióxido de carbono.

CCM: Celda de combustible microbiana es un dispositivo que utiliza microorganismo para convertir la energía química contenida en la materia orgánica en energía eléctrica.

Citocromos: Es una hemo proteína localizada en el espacio intermembrana de la mitocondria donde cataliza la transferencia de electrones entre los complejos III y IV de la cadena de transporte de electrones mitocondrial.

Combustóleo: Es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada.

Conductor iónico: Son electrolitos sólidos que presentan una elevada conductividad iónica dependiente, entre otros factores, del tipo estructural en el que cristalizan.

DBO: Demanda Química de Oxígeno son unos de los parámetros más importantes en la caracterización (medición del grado de contaminación) de las aguas residuales.

DQO₅: Es la demanda química de oxígeno del agua. Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO₂ y H₂O.



Efluentes: Es la salida de agua desde un cuerpo natural de agua o desde una estructura fabricada por el ser humano. Los efluentes, desde el punto de vista humano, se suelen considerar como contaminación.

Elodea canadensis: Es una especie fanerógama acuática muy empleada en acuarios. Taxonómicamente se encuadra en la familia *Hydrocharitaceae*.

Enzimática: Son moléculas orgánicas que actúan como catalizadores de reacciones químicas, es decir, aceleran la velocidad de reacción.

Espirulina: Es un alga unicelular azul verdosa famosa por ser una fuente importante de proteínas, vitaminas y minerales, por lo que destaca por su alto valor nutritivo.

Éter: Es un grupo funcional del tipo R-O-R', en donde R y R' son grupos alquilo, iguales o distintos, estando el átomo de oxígeno unido a estos.

Fitorremediación: Es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas.

Gelificar: Técnica mediante la cual se forma un sólido blando o gelatina a partir de un líquido o semilíquido.

Gram: Son microorganismos patógenos, como algunas especies bacterianas pertenecientes al género *Streptococcus*, y otros beneficiosos para el hombre, entre los que se encuentran las bacterias lácticas (BAL), algunas de las cuales se consideran probióticas.

Inoculo: Es la sustancia que se inocula. «Inoculación» es la introducción voluntaria o accidental, por una herida de los tegumentos, del virus o el principio material de una enfermedad.

Ionómeros: Es el nombre genérico que se les da a los materiales que presentan una reacción entre el polvo de vidrio y el ácido poliacrílico.



Lisis: Se refiere al deterioro de una célula debido a una lesión en su membrana plasmática (exterior).

Microalga: Son microorganismos unicelulares que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis. Esto es, son capaces de generar biomasa orgánica a partir de CO_2 y luz, usando al agua como dador de electrones, oxidándola a O_2 .

Nefelométricas: Es una unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido, sólo líquidos y no aplicable a gases o atmósfera.

Perfluorovinilo: Es un fluoropolímero semicristalino parcialmente fluorado con la unidad de repetición.

Pili: Son apéndices de escasa longitud que se hallan en la membrana de algunas bacterias.

Polución: Contaminación del medio ambiente, en especial del aire o del agua, producida por los residuos procedentes de la actividad humana o de procesos industriales o biológicos.

Proteómica: Estudio de la estructura y la función de las proteínas, incluso de la manera en que trabajan e interactúan en el interior de las células.

Protozoos: Los protozoos son organismos unicelulares microscópicos que pueden ser de vida libre o de naturaleza parasitaria.

Raceway: Es un sistema de producción abierto de microalgas, es donde se realiza la reproducción de estas, se trata de un depósito de pequeña altura, que circula en un circuito cerrado, de tal forma que las células reciben la luz solar y pueden realizar así la fotosíntesis.

Sal de cromo hexavalente: Se utilizan ampliamente en procesos industriales del acero, pinturas, colorantes y cerámicas.

Sulfato: Sal formada al combinar el ácido sulfúrico y otra base.

Tetrafluoruetileno: Es un gas incoloro e inodoro. Se utiliza en la fabricación de propulsores, como agente intermedio y como copolímero.



Transesterificación: Es el proceso de intercambio del grupo orgánico de un éster con el grupo orgánico de un alcohol.

Tricomas: Son finos crecimientos o apéndices de plantas, algas, líquenes y algunos protistas de diversa estructura y función.

Urea: Es un compuesto químico de fórmula $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Se encuentra en mayor proporción en la orina, en el sudor y en la materia fecal.



Resumen

El objetivo de esta investigación fue obtener energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas (CCM's) con la implementación de plantas acuáticas y aguas residuales, debido a que uno de los contaminantes más comunes dentro de las aguas residuales es la materia orgánica.

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos bioelectroquímicos que convierten la energía química disponible en un sustrato biodegradable en energía eléctrica por medio de las reacciones catalíticas que llevan a cabo mediante microorganismos.

Las celdas se diseñaron empleando materiales reciclados con la intención de generar energía eléctrica sin contaminar al medio ambiente, este diseño se le conoce como celda Tipo H la cual consta de dos cámaras, una anódica y una catódica unidas por un puente de intercambio iónico. Se estudiaron los elementos más prácticos para emplearlos como electrodos de las CCM's debido a que es una de las partes fundamentales de la CCM.

En la primera etapa del proyecto se construyeron seis CCM's para evaluar cuál de los prototipos tenían un mejor desempeño, analizando los factores de construcción y determinando que materiales eran los que presentan un mejor rendimiento para generar energía eléctrica.

Durante la segunda etapa se pusieron a prueba las especies de planta acuática para conocer que planta obtiene una mejor adaptabilidad dentro de las CCM's.

Mientras que en la tercera y última etapa de proyecto se realizó un montaje de 15 CCM's con la especie que mejor se adaptó para aprovechar todos los componentes de una celda y así obtener la mayor cantidad de energía eléctrica para ser utilizada en dispositivos electrónicos.



Introducción

La generación de energía a partir de fuentes convencionales tiene un enorme impacto en el entorno. Es por lo que las energías renovables se presentan como la alternativa sostenible y ecológica que vela por el cuidado del planeta (Nabalía.,2019).

En los últimos años se han desarrollado nuevas investigaciones y proyectos a nivel internacional en los cuales la búsqueda es la obtención de fuentes de energía con la mínima contaminación posible, estas nuevas tecnologías van desde el aprovechamiento de energía solar, la utilización de corrientes de viento, el aprovechamiento de corrientes de ríos, medios de generación de biocombustibles entre otras fuentes, estas tecnologías se encuentran en desarrollo y cada una presenta sus ventajas y desventajas, sin embargo, tienen el mismo fin, generar energía eléctrica de manera eficiente sin contaminar demasiado al medio ambiente y tener la menor cantidad de procesos para generarla para así ahorrar costos.

La implementación de celdas de combustible microbianas busca la generación de energía eléctrica de manera diferente a los procesos ya conocidos. Se estima que la utilización de un sustrato biodegradable es la pieza clave para hacer que las celdas de combustible microbianas (CCM) sean una de las mejores fuentes de generación de energía eléctrica, debido a que puede transformar el sustrato biodegradable directamente en electricidad, por medio de la implementación de bacterias, las cuales son las encargadas de transformar la materia orgánica presente en el sustrato en energía eléctrica por medio de su metabolismo, que brinda la liberación de electrones y protones dentro de la CCM, facilitando a los electrones a ser atraídos por los electrodos que se encuentran en cada una de las cámaras de la CCM, obteniendo un circuito cerrado para la generación de energía eléctrica.

Como sustrato biodegradable se optó por la implementación de aguas residuales, lo que resulta en una CCM más eficiente y ecológica para la generación de energía eléctrica, dentro de la CCM se encuentra la cámara anódica que será la encargada de almacenar el sustrato y en condiciones anaeróbicas se busca la viabilidad de las bacterias anaerobias, las cuales son encargadas de la generación de electricidad.



La implementación de plantas acuáticas dentro de celdas de combustible microbianas es un nuevo campo de estudio, debido a que presentan un desarrollo favorable en las CCM's, una de las ventajas de implementar microalgas dentro de la cámara anódica, es que al estar en contacto con el agua residual favorece en la nutrición y crecimiento por lo que la estructura de la microalga se modifica para ser transformada en biocombustibles.

Las plantas acuáticas contribuyen con el proceso de biorremediación en aguas residuales facilitando su descontaminación y dentro del desarrollo de la CCM se utilizaron en una cámara independiente llamada cátodo, una de las razones por las cuales se diseñó que el sistema de la CCM sea de dos compartimentos con diseño tipo H, fue que una carga excesiva de contaminantes puede terminar por matar a las plantas acuáticas.



Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1 Planteamiento del problema

➤ **Cambio climático**

El cambio climático es uno de los principales problemas que enfrenta la humanidad y una de las principales causas de esto es el mal manejo de los recursos naturales. Para combatir este problema o ayudar a retrasar los estragos ocasionados por este, se deben poner en marcha planes estratégicos que no comprometan más a los recursos naturales, ya que, cada día que pasa es un día más que afecta significativamente nuestro planeta.

En los años 80s se mencionaban las consecuencias que podrían presentarse a causa del fenómeno del cambio climático, sin embargo, hoy en día hemos presenciado las consecuencias de su magnitud y los efectos que podrán presentarse en los próximos años.

Los daños radican entre la progresiva degradación de la capa de ozono a causa de los gases de efecto invernadero, el aumento de temperaturas, la ruptura de los ciclos naturales del planeta y la contaminación. Cuando se habla de cambio climático nos referimos a sus síntomas directos, como a los efectos secundarios o colaterales que pueden generar problemas bastante nocivos, como son:

➤ **Sobreexplotación de los recursos naturales**

Los recursos naturales pronto serán insuficientes para la sobrevivencia de las personas que habitan la Tierra. La sobreexplotación de los recursos, el consumo irresponsable y el aumento de la población mundial, se ha triplicado en los últimos 60 años y continuará creciendo a un ritmo acelerado siendo las principales causas de este agotamiento.

➤ **Desaparición de fuentes hídricas**

Las altas temperaturas han provocado la sequía de ríos, lagos, lagunas y otras fuentes hídricas que durante siglos fueron indispensables para la supervivencia y el



desarrollo de pueblos enteros. Hoy en día nos encontramos que los ríos, lagos y lagunas están contaminados, al igual que los océanos y las costas.

La descarga de aguas residuales sin tratamiento provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores, disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas.

En un estudio de Conagua en México del 2012 se presentó que, por medio de los sistemas de tratamiento de agua residual, cada año solo se puede remover cerca de 0.65 millones de toneladas de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) que es una forma de medir los contaminantes presentes en el agua, de las cuales se generan aproximadamente 2 millones de toneladas al año, estamos hablando de un 32.5 % es la cantidad de tratamiento que se realiza a las aguas residuales por lo que el 67.5 % se encuentra en los ríos, lagos, lagunas y mares causando la muerte de flora y fauna (Conagua, 2014).

➤ **Contaminación**

La contaminación ambiental es un fenómeno que afecta directa e indirectamente la salud de las poblaciones, no sólo de seres humanos, pues también altera el equilibrio de los ecosistemas. En general, las personas y los animales de vida silvestre están expuestos a mezclas de más de dos sustancias tóxicas.

Se ha demostrado que casi todos los hidrocarburos son cancerígenos y que son capaces de inducir alteraciones genéticas que tienen repercusiones graves en los organismos. La toxicidad causada por hidrocarburos ha sido estudiada ampliamente en animales para la experimentación, con motivo del incremento de enfermedades en vías respiratorias tipo alérgicas, en piel y algunos tipos de cáncer que han sido observados en personas que trabajan o residen en zonas muy contaminadas por hidrocarburos.

Los contaminantes asociados con la generación de energía eléctrica son unos de los más contaminantes a nivel mundial los principales daños son el cambio climático, degradación de la capa de ozono y la lluvia acida. Las principales



emisiones de un sistema termoeléctrico son: material particulado (PM10), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO). Aproximadamente, las cifras de emisión son de 450 a 800 mg/Nm³ en las centrales que utilizan combustóleo, y de 400 a 1.200 mg/Nm³ en las centrales de carbón.

➤ Deforestación

Cada año desaparecen miles de kilómetros de bosques en el mundo. Se calcula que, desde 1990, se han destruido más de la mitad de los que observamos ahora. Además, los árboles mueren a un ritmo acelerado debido a la contaminación del aire, la sequía de fuentes hídricas aledañas y los cambios bruscos de temperatura. En muy pocos casos existen programas alternativos de siembra, repoblación y protección de las tierras cultivables.

Todas las causas y consecuencias del cambio climático están relacionadas entre sí, por ello realizar un cambio es la mayor prioridad para nuestro planeta. Una solución a esto es impulsar el uso de fuentes de energías renovables que favorezcan al medio ambiente y fomentar la cultura del cuidado del medio ambiente.



1.2 Justificación

Al conocer el daño que le hemos ocasionado al planeta, la humanidad tiene un gran desafío en buscar el reemplazo de combustibles fósiles con fuentes alternas de energía que no generen afectaciones nocivas al medio ambiente a corto, mediano y largo plazo.

Uno de los ejemplos de fuentes alternas de energía, se conoce desde 1910 y es la existencia de microorganismos capaces de transformar materia orgánica en energía eléctrica, en aquella época no tomó un gran protagonismo, sin embargo, en los últimos años se han retomado las investigaciones sobre este sistema de generación de energía eléctrica que se comprende por la implementación de celdas de combustible microbianas.

Las celdas de combustible microbianas (CCM's) proporcionan una alternativa de gran potencial para la extracción de energías útiles de aguas residuales, resolviendo dos problemas actuales los cuales son la demanda energética y la depuración de aguas residuales. Las CCM's trabajan bajo reacciones bioelectroquímicas de esta manera se logra convertir la energía almacenada en los enlaces químicos de compuestos orgánicos en energía eléctrica.

La implementación de CCM's es un aporte hacia los procesos de generación eléctrica y plantas de tratamiento, ayudando con materiales económicos y eficientes, con el fin de integrar y aplicar esta tecnología en los sistemas de tratamiento de agua para la generación de energía eléctrica ya que, se produce en paralelo con la depuración de las aguas residuales, logrando generar energía que pueda ser almacenada.



Capítulo 2. Marco de referencia

2.1 Antecedentes

En las últimas décadas se desarrollaron diferentes investigaciones sobre la búsqueda de materiales aceptores de electrones como son los metales, siendo la mejor alternativa potencial para el tratamiento de efluentes, búsqueda de materiales de bajo costo y basados en la operación de una CCM sin agente catalítico.

El estudio sobre la aplicación de la CCM en el tratamiento de agua residual real a escala piloto y régimen continuo ha aumentado, tomándolo como una alternativa más para el tratamiento de agua residual, por lo cual contribuye a ampliar los conocimientos técnicos sobre el funcionamiento del dispositivo. Se encontró que el empleo de una CCM para el tratamiento de agua residual universitaria con DQO mayor a 400 mg/L genera densidades altas de potencia ($300 \text{ mW}/\text{m}^2$) las cuales son estables para tiempos de retención hidráulicos (TRH's) menores a 10 horas (Kim et al. 2015). Se estima que un menor espaciamiento entre los electrodos y mayor superficie catódica puede ser favorable para la producción eléctrica a partir de agua residual débiles en términos de materia biodegradable y conductividad eléctrica (Das, 2018).

La implementación de CCM's es una alternativa en desarrollo que puede lograr una generación de energía eléctrica de manera favorable, por lo que su investigación a desarrollar nuevos prototipos a gran escala determina la cantidad de energía eléctrica que se puede generar empleando los principios de una CCM.



Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Electroquímica

Es la parte de la química que estudia la producción de energía eléctrica a partir de las reacciones químicas que se presentan entre las diversas sustancias donde se lleva a cabo una transferencia de electrones (Ramírez, 2016).

Su fundamento es la relación entre las reacciones de óxido-reducción, en las que tiene lugar la transferencia de electrones por medio de la oxidación, así como la producción y el uso de la corriente eléctrica.

La electroquímica estudia tres tipos de celdas que han logrado tener aplicaciones a nivel industrial de gran importancia, formando parte de una importante rama de investigación para mejorar este tipo de celdas, estas celdas se pueden clasificar en tres tipos muy generales: celdas galvánicas que son reacciones espontáneas mejor conocidas como pilas, celdas electrolíticas y celdas de combustible.

Las reacciones químicas se dan en la interfaz de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito) pudiendo ser una disolución y en algunos casos especiales, un sólido.

Si las reacciones químicas son provocadas por una diferencia de potencial aplicada externamente, se hace referencia a una electrólisis. En cambio, si la diferencia de potencial eléctrico es creada como consecuencia de la reacción química, se conoce como un "acumulador de energía eléctrica", también llamado batería o celda galvánica.

Las reacciones de reducción-oxidación son reacciones de transferencia de electrones, esta transferencia se produce entre un conjunto de elementos químicos, un oxidante y un reductor (una forma reducida y una forma oxidada respectivamente). En dichas reacciones, la energía liberada de una reacción espontánea se convierte en electricidad o bien se puede aprovechar para inducir una reacción química no espontánea.



La electroquímica está presente en diferentes tipos de industrias como extracción de metales y refinado, obtención de compuestos como flúor, sodio, perácidos, así como el tratamiento de aguas y en baterías y celdas de combustible, por mencionar algunos de los ejemplos que se encuentran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

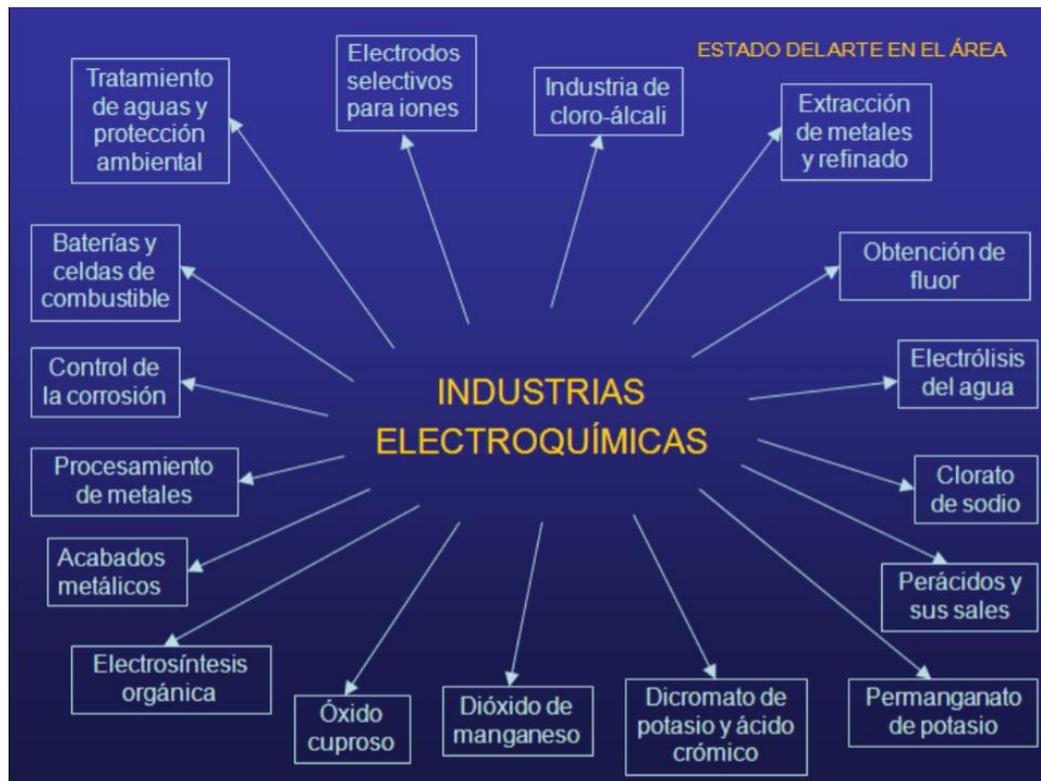


Figura 1. Aplicaciones de las celdas electroquímicas a nivel industrial. Imagen tomada de (Farrera, 2014)

3.1.1 Celda electrolítica

Una celda electrolítica consta de dos placas metálicas conectadas a una fuente de corriente eléctrica, que puede ser una pila o batería. Estas dos placas se llaman electrodos y están sumergidas en el electrolito, en la Figura 2 se pueden apreciar las partes fundamentales de una celda electroquímica.

La batería actúa como una bomba de electrones, ya que los impulsa de un electrodo hacia el otro. El electrodo que pierde electrones adquiere una carga positiva y el que la gana logra una carga negativa. El electrodo positivo se llama “ánodo” y atrae a los aniones y el electrodo negativo capta los cationes y se llama “cátodo”.



Las reacciones químicas se llevan a cabo en los electrodos. En el cátodo siempre se realiza la reducción y en el ánodo la oxidación. Estas celdas producen reacciones químicas no espontáneas como resultado de un potencial aplicado (Ramírez, 2016).

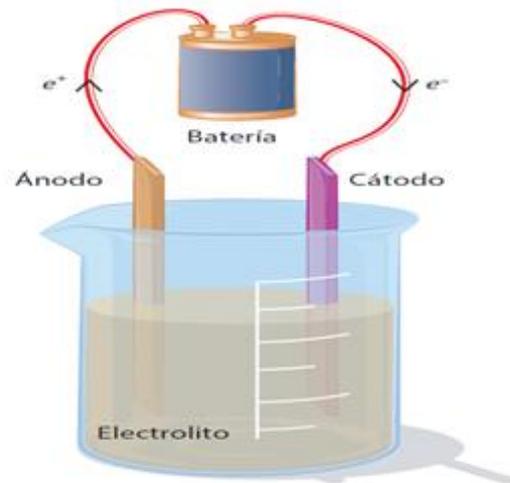


Figura 2. Celda electrolítica. Se muestran las partes fundamentales de la celda ánodo, cátodo, batería y electrolito. Imagen tomada de (Ramírez, 2016)

Este proceso impulsado por una fuente externa de energía eléctrica, se denomina electrólisis y tiene lugar en celdas electrolíticas. La electrólisis tiene otras aplicaciones como la galvanostegia o galvanoplastia, que comprende el conjunto de operaciones necesarias para recubrir los metales con otros de distinta naturaleza, mediante la acción de la corriente eléctrica en baños de soluciones salinas, como por ejemplo el chapeado de objetos de cobre con oro o plata.

3.1.2 Celda galvánica

Una celda galvánica es un dispositivo para generar electricidad mediante una reacción redox espontánea. Consta de dos electrodos, sumergidos con disoluciones apropiadas, unidos por un puente salino, conectado por un voltímetro que permite el paso de los electrones. La Figura 3 muestra las principales componentes de la celda galvánica, conocida comúnmente como celda Daniel.



El funcionamiento de la celda se basa en el principio de oxidación de Zn a Zn^{2+} y la reducción de Cu^{2+} a Cu se pueden llevar a cabo simultáneamente, pero en recipientes separados, con la transferencia de electrones a través de un alambre conductor externo. Las barras de zinc y cobre serán los electrodos. Esta distribución particular de electrodos y de soluciones ($ZnSO_4$ y $CuSO_4$) se conoce como celda de Daniel (Chang, 2017).

Lo que significa que la pérdida de electrones durante la oxidación de un ion se distingue por su número de oxidación, por otro lado, la reducción de un ion implica una disminución en su número de oxidación debida a la ganancia de electrones (Ramírez, 2016).

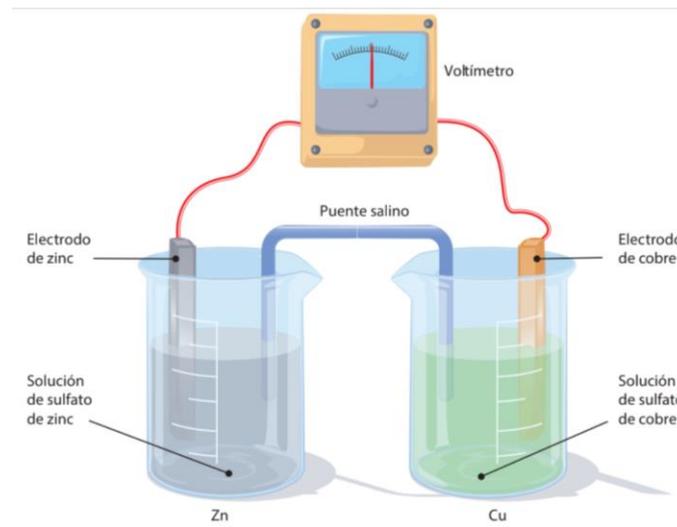


Figura 3. Celda galvánica de zinc – cobre (Daniel) con puente salino de cloruro de potasio. Imagen tomada de: (Ramírez, 2016)

Las celdas galvánicas están constituidas por un electrolito, comúnmente solución acuosa de sustancias disociadas, electrodos en el que el ánodo se llevarán a cabo las reacciones de oxidación, en el cátodo se llevarán a cabo las reacciones de reducción y el uso de un puente salino o membrana.

Entre sus aplicaciones destacan la creación de pilas alcalinas, pilas de botón y acumuladores, sin embargo en la industria se emplea para tratar los fenómenos de corrosión en instalaciones de tuberías las cuales quedan expuestas al intemperie.



3.1.3 Celda de combustible

Las celdas de combustible son dispositivos que convierten la energía de una reacción electroquímica directa de oxidación (para lo cual consumen oxígeno), en energía eléctrica, al ser alimentadas con un combustible convencional como gas, alcohol u otros químicos. Se diferencian de las celdas galvánica y voltaica, en que no son espontáneas, ya que producen energía eléctrica solo cuando se alimentan el combustible y el oxidante (Farrera, 2014). En la Tabla 1 se mencionan algunas de las celdas de combustible más utilizadas, así como su componente; electrolito, catalizador y la reacción que se produce, algunos de los ejemplos son Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP) y la Celda de combustible alcalina (CCA).

El fundamento en la generación de electricidad a partir del uso de elementos químicos como el hidrógeno a modo de combustible y el oxígeno como oxidante de una reacción, donde además se captura del aire en el ambiente.

De esta forma la oxidación de hidrógeno en agua hace la reacción que genera energía eléctrica y calor, se logra alimentar el hidrógeno en el ánodo de la celda y el oxígeno en el cátodo, los cuales están separados por una membrana electrolítica.

El hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, donde una cubierta de platino ayuda a quitar los electrones a los átomos de hidrógeno dejándolo ionizado, en forma de protones (H^+). La membrana electrolítica permite el paso solo de los protones hacia el cátodo.

Las celdas de combustible se consideran una de las formas alternativas con mayor ventaja para la obtención de energía. Debido a que la generación de energía eléctrica es directa, la eficiencia que alcanza una celda de combustible puede ser muy elevada alcanzando el 80% cuando además de recuperar electricidad también se recupera calor. Este valor supera ampliamente las eficiencias de otros sistemas convencionales. Al no tener partes en movimiento son muy silenciosas (Das, 2018).



Tabla 1. Tipos de celda de combustible (Vázquez, 2017)

Celda	Electrolito	Catalizador	Reacción
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP)	Polímero sólido	Platino	Ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ Global: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
Celda de combustible alcalina [CCA]	Solución acuosa	Platino	Ánodo: $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ Global: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
Celda de combustible de metanol directo [CCMD]	Polímero sólido	Metales Preciosos	Ánodo: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6e^- + 6H^+$ Cátodo: $6H^+ + 1.5O_2 + 6e^- \rightarrow 3H_2O$ Global: $CH_3OH + 1.5O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
Celda de combustible ácido fosfórico [CCAF]	Ácido fosfórico	Platino sobre base de carbono	Ánodo: $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ Global: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
Celda de combustible de carbonato fundido [CCCF]	Solución de K, Li y Na	Materiales de los electrodos	Ánodo: $H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ Global: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$
Celda de combustible de óxido sólido [CCOS]	Óxidos refractarios	Materiales de los electrodos	Ánodo: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ Global: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
Celda de Combustible Microbiana [CCM]	Agua residual, bacterias	Medios de cultivo mixtos	Ánodo: $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$ Cátodo: $6O_2 + 24H^+ + 24e^- \rightarrow 12H_2O$ Global: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$



3.2 Celda de combustible microbiana (CCM)

3.2.1 Componentes de la celda de combustible microbiana

Una celda de combustible microbiana (CCM o MFC) son dispositivos con un sistema bioelectroquímico que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, lo cual es posible cuando, bajo condiciones anaerobias, algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (Du., et al., 2007).

Una CCM normalmente está compuesta por dos cámaras tal como se observa en la Figura 4. Un esquema de la celda de combustible microbiana, en cada una de las cámaras se coloca un electrodo este puede ser de diversos materiales, los más recomendables son de materiales metálicos o electrodos de carbono, el ánodo será representado por la cámara anaeróbica y el cátodo por la cámara aeróbica, unidas por un intercambiador iónico. La cámara anaeróbica contiene sustratos orgánicos que, al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y CO_2 . Una vez los electrones se liberan en la cámara anódica, éstos son captados por el electrodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo para obtener electrones y así completar el circuito (Revelo M et al., 2013).

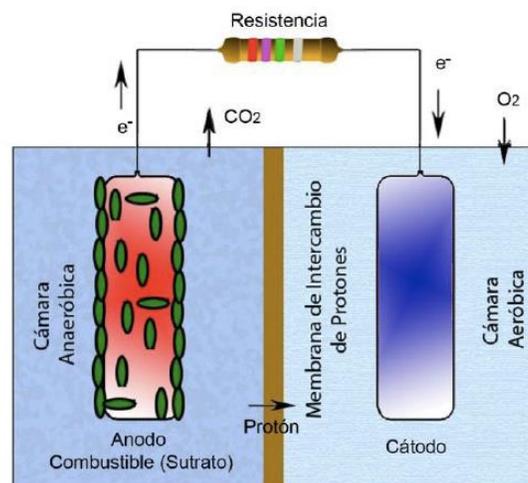


Figura 4. Composición principal de una Celda de combustible microbiana. Presenta la cámara anaeróbica, aeróbica, cátodo, ánodo y el puente de intercambio. Imagen tomada de: (Revelo, 2013)



Las celdas de combustible microbiano son una tecnología emergente que es capaz de generar energía eléctrica y remover la materia orgánica que exista en el sustrato como lo es el agua residual. Las CCM's pueden ser grandes (a escala de litros) o pequeños (microlitro-escala o mililitro-escala) (Das, 2018).

Estas celdas se diferencian con otros sistemas gracias a que estos dispositivos se logran mantener en condiciones independientes y no requieren de muchos procesos para lograr una generación de energía, esto quiere decir que se pueden instalar en cualquier parte, ya que operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a bajas temperaturas, en comparación de otras tecnologías que emplean combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, las cuales presentan una producción de contaminantes muy elevada, por ello las CCM's apoyan al cuidado del medio ambiente ya que su contaminación de CO₂ es insignificante y no afecta al medio ambiente.

Una CCM logra una generación de energía limpia utilizando aguas residuales, por lo que son consideradas como una tecnología emergente debido a destacar la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales simultáneamente, esto se debe a la composición de las aguas residuales las cuales poseen algunos microorganismos que contribuyen en la transferencia de energía eléctrica y al estar en un medio en condiciones anaeróbicas favorece esta transferencia, siendo las encargadas tanto de la generación eléctrica como del tratamiento de aguas residuales, resultando ser un sistema muy efectivo y de bajo costo.

3.2.2 Transferencia de electrones

Para que se pueda generar electricidad se necesita que los microorganismos transfieran sus electrones al electrodo en la cámara anaeróbica, esta transferencia de electrones se da por varios mecanismos como la transferencia directa vía citocromos tipo c de la membrana externa, la transferencia mediante nanocables bacterianos, y los transportadores solubles (Jibaja et al., 2018).

Se ha demostrado que la bacteria *Geobacter* es capaz de transferir electrones directamente a los electrodos y así servir como donadores de electrones directos



para la respiración anaeróbica. Este hallazgo tiene implicaciones para la recolección de electricidad de sedimentos anaeróbicos y biorremediación de contaminantes oxidados (Lovley DR et al., 2004).

La presencia de nanocables o pili en algunos microorganismos como: *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis*, son necesarios para el crecimiento de estas bacterias. Los nanocables son los encargados de realizar la conexión eléctrica entre la célula y los óxidos de Fe (III) teniendo contacto directo con el ánodo de una celda de combustible microbiana o formando una red entre las células para facilitar la transferencia de electrones a través de la biopelícula, sabiendo que *Geobacter* crece en monocapa y los nanocables proveen soporte estructural en la formación de dicha biopelícula siendo esenciales en la generación de la corriente, en la Figura 5 se observa la bacteria *Geobacter*, así como los nanocables o llamados pillis. (Jibaja et al., 2018).

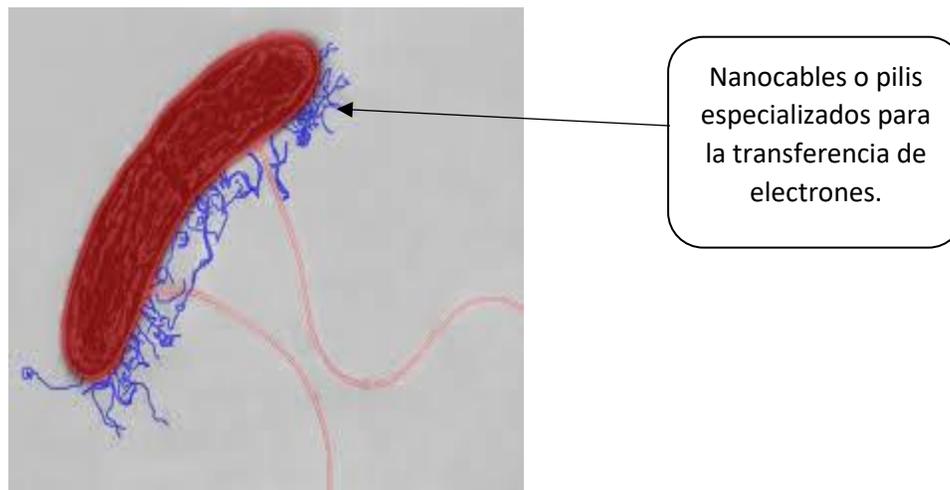


Figura 5. Bacteria Geobacter, se observan pequeñas estructuras llamadas pilli encargadas de la transferencia de electrones, encargados de realizar la conexión eléctrica entre la célula y los óxidos de Fe (III). Imagen tomada y modificada de: <http://josejuancanel-jose.blogspot.com/2014/10/geobacter-bacteria-para-la-limpieza-de.html>



3.2.3 Electrodo

Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo, un semiconductor, un electrolito, un gas, entre otros. (Faraday, Michael 1834). El electrodo es el encargado de permitir el ingreso y la salida de electrones que se generan dentro de las cámaras en la CCM haciendo que los electrodos tengan un gran protagonismo dentro de las CCM's, por ello la importancia de tener electrodos de acuerdo con las necesidades que presente el sistema será el factor que determine la velocidad de atracción. El material debe permitir que las bacterias formen biopelículas y debe ser de un material conductor no corrosivo. (Varanasi et al. 2016).

Los electrodos pueden ser de materiales metálicos sólidos o de carbono, aunque también es posible utilizar un amplio rango de otros materiales, incluyendo polímeros y cerámicas conductores, en la CCM los electrodos positivo y negativo se llaman ánodo y cátodo, respectivamente. Estos se pueden observar en la Figura 6, donde se diferencian los dos electrodos. (Frank Walsh, 1999).

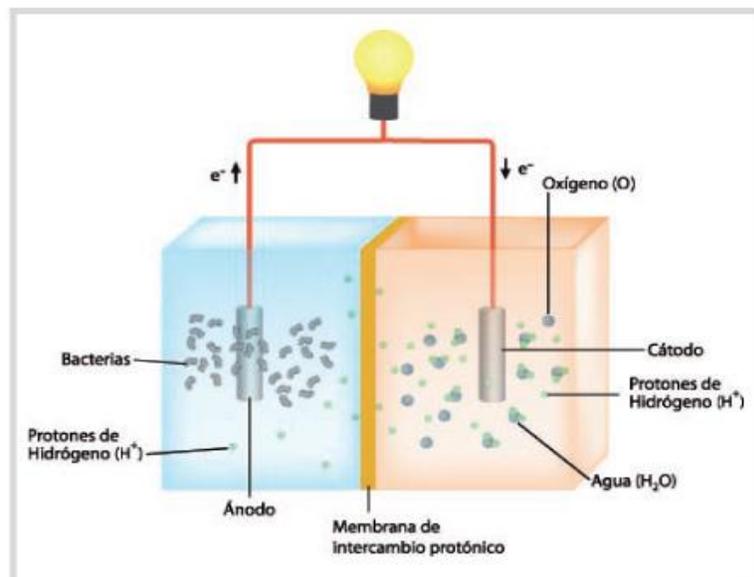


Figura 6. Representación de una Celda de Combustible Microbiana, diferenciando los dos electrodos. Imagen tomada de: (Conogasi, 2018).



3.2.4 Ánodo

El ánodo es uno de los componentes esenciales de las CCM's, junto con el cátodo y el electrolito. Es aquí donde las bacterias catalizan la oxidación del sustrato y liberan electrones como resultado de la respiración. En esta cámara se utilizará agua residual como mediador de sustrato.

La selección del electrodo junto con el tipo de material es un factor muy importante, los materiales más recomendables como ánodos son los metales y materiales de carbono, que se destacan por su configuración y área superficial, además de tener un fácil acceso a ellos.

Entre los electrodos anódicos más utilizado se encuentra el acero inoxidable, platino, oro, sin embargo, los materiales de carbono son los más prácticos gracias a sus propiedades físicas, se pueden presentar como (grafito, fieltro de grafito, papel carbono, tela de carbono, malla de carbono, carbono vitreo reticulado) (Logan, et al., 2005). Estos materiales pueden estar disponible en barras, placas o gránulos, fáciles de manejar, tienen un área de contacto definida, alta conductividad, buena biocompatibilidad, como principal ventaja una mayor área superficial, gran estabilidad química y su costo relativamente bajo.

Los materiales metálicos presentan una mejor conducción de electricidad en comparación a los electrodos de carbono. Sin embargo, al tener que estar en contacto con agua se genera corrosión afectando al rendimiento de la CCM.

Se han empleado distintos materiales metálicos como el acero inoxidable, pero la desventaja es que no alcanza a obtener densidades de potencia elevadas, en comparación con los materiales de grafito. El uso de platino como electrodo presenta un excelente comportamiento dentro de las CCM's, sin embargo, solo es durante los primeros días puesto que se genera una acumulación de los productos fermentados, ya que presentan una intoxicación dentro del platino, perdiendo su actividad electrocatalítica. Al utilizar electrodos de oro se ha encontrado que el microorganismo *Geobacter sulfurreducens* puede crecer en los ánodos de oro produciendo corrientes tan eficaces como electrodos de grafito (Gretel, 2016).



3.2.5 Cátodo

Por lo general, los electrones empleados para el cátodo en una CCM son de materiales conductores no corrosivos, aunque la mayoría de los materiales empleados en el ánodo también pueden ser utilizados como cátodos. El oxígeno será el aceptor de electrones debido a su alto potencial de oxidación, abundancia, disponibilidad y bajo costo. Por este motivo se colocan en la CCM plantas acuáticas dentro de la cámara catódica contribuyendo con el suministro de oxígeno.

El uso de cátodos con carbono como único catalizador presenta una cinética muy lenta para la reducción de oxígeno, para incrementar esta oxidación el electrodo de platino es el más utilizado, aunque su desventaja es que tiene un costo elevado por lo que se recomienda utilizar 0.1 mg/cm para reducir el costo y como alternativa se proponen catalizadores de hierro (II) (Logan et al., 2007).

No obstante, los materiales de carbono no son precisamente malos, por lo que se pueden emplear estos materiales como una alternativa menos costosa: grafito, fieltro de carbono, papel carbono, tela de carbono, carbono, la espuma, el carbono vítreo, el acero inoxidable y la malla de titanio se encuentran entre los materiales utilizados como cátodo (Das, 2018).

3.2.6 Grafito

El grafito es un mineral perteneciente a la clase de los elementales, y en su composición concreta interviene un elemento semimetálico. La conducción eléctrica del grafito se debe a que los átomos de carbono están formando una red tridimensional en la que se disponen los átomos en láminas. Los enlaces covalentes que se forman entre ellos son particulares porque implica una hibridación sp^2 , esto significa que forma tres enlaces covalentes en el mismo plano y que un orbital II perpendicular a este plano queda libre, por lo que estos orbitales forman una banda de conducción que hace que los electrones se puedan mover libremente entre átomos de carbono, lo que explica la conductividad eléctrica de este compuesto, la Figura 7 muestra de forma gráfica como se representan los enlaces entre los átomos de carbono, en la molécula.

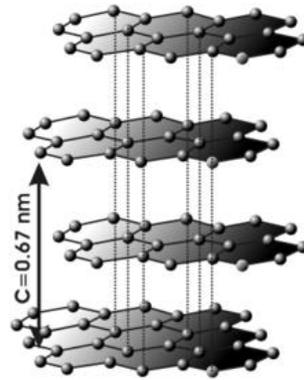


Figura 7. Representación gráfica de los enlaces covalentes entre los átomos de carbono en el grafito. Imagen tomada de: <http://nano-sostenible.com/2018/02/01/la-diferencia-atmica-entre-los-diamantes-y-el-grafito/>

Gracias a esas características logra ser un material muy eficiente dentro de las CCM's debido a sus diversas cualidades como son:

- Conductor de electricidad
- Resiste el ataque químico, el choque térmico, la contracción y la oxidación
- Bajos coeficientes de fricción, expansión térmica y permeabilidad.

3.2.7 Sistema de intercambio de protones

3.2.7.1 Membrana

Un sistema de intercambio de protones es aquel que impide el paso de electrones de la cámara anódica a la catódica y deja pasar los protones, puede ser de varios tipos: membrana de intercambio de cationes (MIC), membrana de intercambio de aniones, membrana bipolar, membrana de microfiltración, membrana de ultrafiltración, puente salino, fibra de vidrio, membranas porosas y otros materiales para filtrado (Li et al., 2011).

El separador con mayor recurrencia es la MIC que también se conoce como membrana de intercambio de protones (MIP) y entre ellas es muy común la Nafion®,



un producto de DuPont Inc., USA, que muestra una alta permeabilidad a los protones (Revelo, M. et al., 2013).

Es el primero de una clase de polímeros sintéticos con propiedades iónicas que se llaman ionómeros. Las propiedades iónicas únicas de Nafion® son el resultado de incorporar grupos éter de perfluorovinilo terminados con grupos sulfonato en una cadena principal de tetrafluoroetileno (PTFE). Los protones en los grupos SO_3H (ácido sulfónico) "saltan" de un sitio ácido a otro. Los poros permiten el movimiento de los cationes, pero las membranas no conducen aniones ni electrones. Nafion puede fabricarse con varias conductividades catiónicas. (Heitner, 1996) La Figura 8 muestra la estructura principal de la membrana de Nafion® una de las principales membranas utilizadas en las celdas de combustión microbiana.

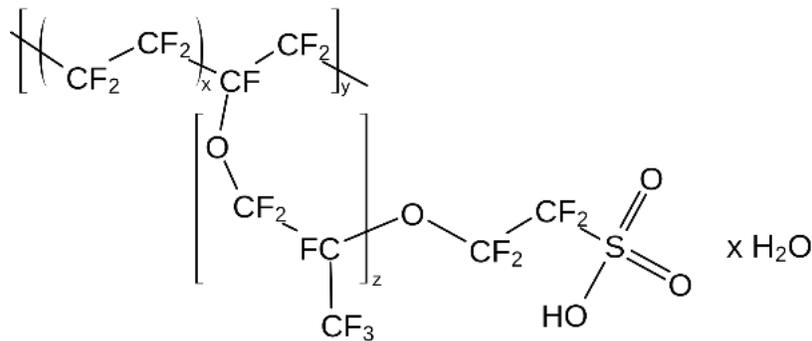


Figura 8. Estructura de la membrana de intercambio protónico, llamada Nafion® Imagen tomada de: (Heitner, 1996)



3.2.7.2 Puente de intercambio

Se conoce como puente de intercambio o puente salino, a un dispositivo que permite aislar los contenidos de las dos partes de la celda mientras se mantienen el contacto entre ellas. En el puente salino se agrega un electrolito relativamente inerte, normalmente se utiliza yoduro de potasio o sulfato de sodio, se recomienda gelificar el electrolito con agar para ayudar a prevenir la mezcla de líquidos.

Un puente de intercambio permite el flujo de los iones dentro de cada cámara para mantener un equilibrio en la carga entre las cámaras de la oxidación y la reducción, y a su vez mantiene separado el contenido de cada cámara, tal como se puede observar en la Figura 9, con la representación gráfica del puente salino en una celda galvánica. De esta manera se logra tener un equilibrio entre las cámaras, los electrones pueden fluir libremente y las reacciones de reducción y oxidación pueden continuar (Skoog et al., 2014).

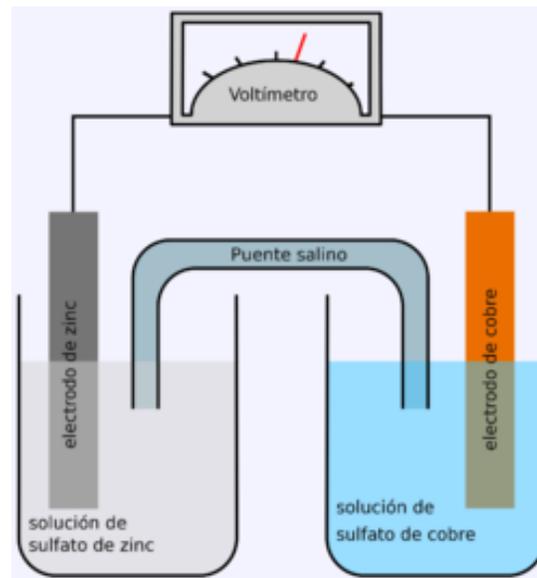


Figura 9. Representación del puente salino en una celda galvánica

Imagen

tomada

de:

<http://www.qfa.uam.es/labqui/practicas/practica19.pdf>



3.2.8 Sustratos

El sustrato es uno de los aspectos más importantes de la celda de combustible microbiano (CCM), constituye el combustible a partir del cual se genera la energía. En la literatura científica se encuentran diversos trabajos en los que se emplea una gran variedad de sustratos, desde compuestos puros hasta mezclas complejas. Se han investigado distintos sustratos desde sustratos simples como glucosa y acetato, pero en los últimos años las investigaciones se centran en la utilización de sustratos menos convencionales con el fin de utilizar la biomasa presente en aguas residuales de diversos tipos y adicionalmente depurarlas y generar energía (Revelo, M. et al., 2013). A diferencia de los compuestos puros los sustratos complejos requieren para su degradación una comunidad microbiana diversa y electroquímicamente activa, cuyas poblaciones se van seleccionando, dependiendo del tipo de sustrato ya que dependerá del desempeño de la celda, como se muestra en la Figura 10 se encuentra una CCM utilizando glucosa como sustrato para generar energía eléctrica. De esta forma existen otros sustratos que pueden ser utilizados como, por ejemplo: aguas residuales provenientes del procesamiento de frutas y vegetales, suero de queso, melazas de destilerías, aguas residuales de biorrefinerías, aguas residuales de industrias farmacéuticas con contaminantes recalcitrantes, residuos agrícolas, entre otros. Además, se ha demostrado que las CCMs pueden utilizar como sustratos no sólo material orgánico degradable, sino también material resistente a la biodegradación (Revelo M et al., 2013).

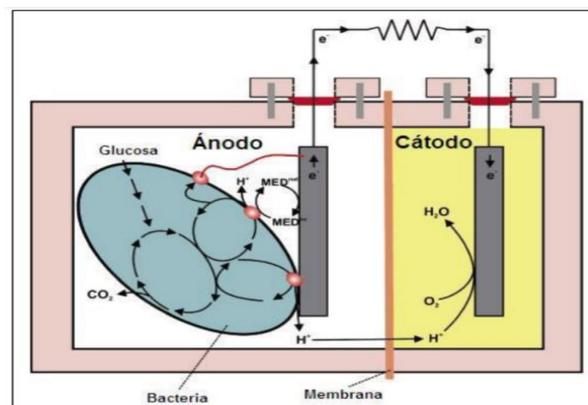


Figura 10. Celda microbiana empleando glucosa como sustrato. Imagen tomada de: (Rabaey y col., 2003)



El uso de sustrato es de gran importancia en un sistema de CCM, por lo que se debe considerar el costo de este y las ventajas o desventajas de emplearlo. Uno de los sustratos más fácil de conseguir, abundante y económico, es el agua residual.

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. 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 (Revelo M et al., 2013).

La eficiencia de la CCM igualmente está afectada por sus condiciones de operación, entre ellas el pH electrolítico. Los gradientes de pH se producen por la acidificación en la cámara anódica y la alcalinización en la cámara catódica, esto se presenta debido a que en las reacciones anódicas producen protones y en las reacciones del cátodo se consumen protones. Cuando en la cámara anódica la difusión y la migración de los protones a través de la membrana intercambiadora de protones es lenta, se produce una disminución del pH ocasionando una disminución drástica de la actividad bacteriana y por consiguiente se afecta la transferencia de protones hacia la cámara catódica (Huang, et al., 2011).

Una celda de combustible microbiano convierte un sustrato biodegradable directamente a electricidad. Esto se consigue cuando las bacterias, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa o agua residual, a un aceptor de electrones. En una CCM las bacterias no transfieren directamente los electrones producidos a su aceptor terminal, sino que estos son desviados hacia la cámara del ánodo. Esta transferencia puede ocurrir de varias formas, bien sea a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble, y los electrones fluyen a través del electrodo (Alzate G. et al., 2008).



3.2.8.1 Agua residual

Se entiende por aguas residuales a la recolección, tratamiento y vertimiento o reutilización de aguas residuales que son aquellas aguas que por uso del hombre representan un peligro y deben ser desechadas, estas contienen gran cantidad de sustancias y microorganismos que deben ser tratados para la reutilización del agua residual (Espigares, 1985).

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable de las actividades humanas. Por lo que representa un hecho el vertido de aguas residuales sin depurar, ocasionando contaminación a la tierra, en ocasiones irreversibles, afectando tanto a ecosistemas acuáticos y el vertido de aguas residuales no tratadas supone riesgos para la salud pública.

El tratamiento de las aguas residuales se somete a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen por objeto reducir la concentración de los contaminantes y permitir el vertido de los efluentes depurados, minimizando los riesgos tanto para el medio ambiente, como para la población.

La escasez de recursos hace necesario el proceso de depuración de aguas residuales, buscando soluciones que presenten el mínimo coste energético, un mantenimiento simple y un correcto funcionamiento. A este tipo de tecnologías se las conoce como tecnologías no convencionales.

Las tecnologías no convencionales son una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas entidades de población. De este modo las CCM pueden brindar una alternativa al tratamiento de aguas residuales ya que gracias a su proceso metabólico de las bacterias presentes en una CCM se logra la eliminación de la carga orgánica que existe en el agua residual.

La calidad del agua se mide a través de tres indicadores:

1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), indicador de la materia orgánica que disminuye el oxígeno en el agua.
2. Demanda química de oxígeno (DQO), que se utiliza como indicador de contaminantes de descargas no municipales, es decir provenientes de descargas industriales.



3. Sólidos suspendidos totales (SST), que provienen principalmente de las aguas residuales y la erosión del suelo (Ceja, 2019).

Las aguas residuales se clasifican en tres partes:

- **Aguas residuales domésticas:** Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente.
- **Aguas residuales municipales:** Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.
- **Aguas residuales industriales:** Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras.

Los principales problemas asociados a las aguas residuales son el déficit de cobertura a nivel nacional, no se brinda un tratamiento de agua adecuado debido al exceso de aguas residuales y deterioro de los suelos.

3.2.8.1.1 Ciclo de aguas residuales

En este ejemplo de un ciclo de manejo de aguas residuales se observan los usos adecuados y los usos inadecuados de las aguas residuales, por lo que es muy importante conocer la utilidad del agua tratada e implementar más dispositivos o plantas de tratamiento que ayuden con esta labor, aprovechando la mayor cantidad de agua residual que se genera en cada región, en la Figura 11 se observa el ciclo de manejo de las aguas residuales municipales.



Figura 11. Ciclo de manejo de las aguas residuales municipales.

Imagen tomada de: (Gómez, 2014)

3.2.8.1.2 Características físicas del agua residual

Las principales características físicas de un agua residual son su contenido de sólidos, temperatura, turbidez, color, olor y conductividad.

➤ Sólidos Totales

Los sólidos totales presentes en el agua residual se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables.

- **Sólidos suspendidos:** Son las partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales, basuras, entre otros, y aquellos otros objetos que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos sencillos. Dentro de los sólidos suspendidos se pueden distinguir los sólidos sedimentables, que se depositarán por gravedad en el fondo de los receptores. Estos sólidos sedimentables, son una medida aproximada de la cantidad de fango que se eliminará mediante sedimentación (Espigares García, 1985).



- **Sólidos filtrables:** Esta fracción se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 10^{-3} y 1 micra. Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación. Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas y iones que se encuentran disueltos en el agua. Por lo general, se requiere una coagulación seguida de sedimentación para eliminar estas partículas de la suspensión (Espigares García, 1985).

➤ Temperatura

La temperatura de las aguas residuales es mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. Las descargas calientes son otra causa de este aumento de temperatura. La temperatura del agua es un parámetro muy importante ya que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos.

➤ Turbidez

La medición de la turbidez se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones. El material residual en suspensión coloidal impide la transmisión de luz, ya que la observe o dispersa, estas suspensiones se emplean como patrones primarios de referencia y los resultados se dan en unidades nefelométricas de turbiedad. (Espigares García, 1985)

➤ Color

El color es un indicativo de la edad de las aguas residuales. El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro.

En esta condición, se dice que el agua residual es séptica que ha sufrido una fuerte descomposición bacterias bajo condiciones anaeróbicas. El oscurecimiento de las aguas residuales se da con frecuencia a causa de la formación de varios sulfuros,



en particular sulfuro ferroso (FeS) esta formación de sulfuros se debe a que está en contacto con metales divalentes como puede ser el hierro. (METCALF-EDDY, 1977)

➤ Olor

El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica. Los olores pueden ser medidos mediante métodos sensoriales e instrumentales (RIVAS MIJARES, 1978).

➤ Conductividad

La conductividad eléctrica del agua es la medida de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica, la corriente eléctrica es transportada por iones en solución, esta es expresada en microhoms por centímetro ($\mu\Omega/\text{cm}$).

3.2.8.1.3 Características químicas

➤ Materia orgánica

La materia orgánica está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas, grasas y aceites provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. Estos contaminantes son biodegradables, es decir, pueden ser transformados en compuestos más simples por la acción de microorganismos naturales presentes en el agua, cuyo desarrollo se ve favorecido por las condiciones de temperatura y nutrientes de las aguas residuales domésticas (Espigares García, 1985).

➤ Materia inorgánica

Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables.

➤ Gases

Las aguas residuales contienen diversos gases con diferente concentración. Como pueden ser, oxígeno disuelto, ácido sulfhídrico, anhídrido carbónico, metano, entre otros gases malolientes.



➤ **Demanda química de oxígeno (DQO).**

Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente los materiales orgánicos presentes en una muestra de agua. Esta oxidación degrada el material orgánico biodegradable y no biodegradable.

El método consiste en someter a la muestra a un agente químico oxidante fuerte (dicromato potásico) en un medio ácido a alta temperatura y en presencia de un catalizador (sulfato de plata). Es un indicador de la contaminación orgánica de los vertidos, tanto la materia biodegradable, como la que no lo es.

➤ **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).**

El parámetro de polución orgánica más utilizado y aplicable a las aguas residuales y superficiales es la DBO a los 5 días (DBO5). Supone esta determinación la medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de materia orgánica biodegradable. La medida de la DBO es importante en el tratamiento de aguas residuales y para la gestión técnica de la calidad de agua porque se utiliza para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica.

La DBO se define como la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica de una muestra.

El periodo normal de incubación es de 5 días, periodo en el que se consume aproximadamente entre el 60 y el 70 por ciento de toda la materia orgánica. En un periodo de 20 días se completa la oxidación del 95 a 99.

La temperatura de incubación es de 20 °C. Como un valor medio representativo de temperatura que se da en los cursos de agua que circulan a baja velocidad en climas suaves, y es fácilmente duplicada en un incubador. La muestra tiene acondicionada con una solución especialmente preparada de modo que se asegure la disponibilidad de nutrientes y oxígeno durante el periodo de incubación.

En caso de muestras con baja población de microorganismos es necesario realizar una inoculación de la muestra para asegurar la oxidación bioquímica de la materia orgánica.



Se adicionan inhibidores de nitrificación, para evitar el proceso de oxidación del NH_4 a NO_3 .

En la Tabla 2 y Tabla 3 se observan ejemplos de aguas residuales domésticas y urbanas.

Tabla 2. Composición típica de un agua residual doméstica (Metcalf-Eddy, 1991).

Componente	Intervalo de concentraciones		
	Alta	Media	Baja
Materia sólida, mg/l	1200	720	350
disuelta total	850	500	250
inorgánica	525	300	145
orgánica	325	200	105
en suspensión	350	220	100
inorgánica	75	55	20
orgánica	275	165	80
Sólidos decantables, ml/l	20	10	5
DBO_5 a 20°C , mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, mg/l	290	160	80
DQO, mg/l	1000	500	250
Nitrógeno, mg/l N, total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo, mg/l P, total	15	8	4
orgánico	5	3	1
inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad, mg/l CaCO_3	200	100	50
Grasa, mg/l	150	100	50

Metcalf-Eddy. "Tratamiento y depuración de las aguas residuales". 1991

Tabla 3. Valores típicos de los principales contaminantes de las aguas residuales urbanas procedentes de pequeñas aglomeraciones. (Centro de nuevas tecnologías del agua, Manual de depuración de aguas residuales urbanas)

Parámetro	Rango habitual
Sólidos en Suspensión (mg/l)	300 – 500
DBO_5 (mg/l)	400 – 600
DQO (mg/l)	800 – 1.200
Nitrógeno (mg N/l)	50 – 100
Fósforo (mg P/l)	10 – 20
Grasas (mg/l)	50 – 100
Coliformes Totales (UFC/100 ml)	10^7 - 10^8



➤ Reducción de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Una elevada DBO implica una disminución del oxígeno disuelto del agua, pudiendo causar anaerobiosis y muerte de organismos. De ahí que su eliminación constituya un objetivo principal del tratamiento de aguas (Abdel-Raouf et al. 2012). La utilización de microalgas ha demostrado ser eficiente en la reducción de DBO y DQO (Li et al. 2011, Abdel-Raouf et al. 2012) generando oxígeno a las bacterias aeróbicas que ayudan con la biotransformación (Abdel-Raouf et al. 2012, Pérez et al. 2014).

➤ Procesos biológicos

Una CCM presenta un proceso biológico que integra al tratamiento del agua, las actividades radiculares de las plantas son una de las modalidades de esta tecnología para el tratamiento de agua y la producción de los microorganismos del suelo. Las raíces de las plantas actúan como bombas aspirantes, extrayendo del suelo el agua y sales minerales necesarias para su desarrollo. La mayor parte de estos aportes procederá de las aguas residuales a tratar. En cuanto a los microorganismos del suelo, las acciones más importantes se deben a bacterias (fundamentalmente), hongos, algas y protozoos. Estos microorganismos intervienen tanto en la descomposición de la materia orgánica aportada por el agua residual, como en el reciclaje de los nutrientes.

3.2.8.1.4 Características biológicas

Las aguas residuales dependiendo de su composición y concentración, pueden llevar en su composición gran cantidad de organismos. Un factor influyente es la presencia de temperatura y pH, puesto que cada organismo requiere unos valores determinados de estos dos parámetros para desarrollarse, uno de los principales organismos que se encuentran en las aguas residuales son las bacterias (Espigares, 1985).



➤ **Bacterias**

Las bacterias son las protagonistas de la generación de energía eléctrica por lo que juegan un papel fundamental dentro de las CCM's. Pueden clasificarse, por medio de su metabolismo, en heterótrofas y autótrofas. Las bacterias autótrofas son aquellas que se nutren de compuestos inorgánicos, tomando la energía necesaria para sus biosíntesis a partir de la luz bacterias fotosintéticas: familia *Thiorhodaceae*, *Chlorobiaceae* o a partir de ciertas reacciones químicas (bacterias quimiosintéticas: *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Hydrogenomonas*, *Thiotrix*).

El tratamiento biológico de las aguas residuales, las bacterias heterótrofas constituyen el grupo más importante, por su necesidad de compuestos orgánicos para el carbono celular. Las bacterias autótrofas y heterótrofas pueden dividirse, a su vez, en anaerobias, aerobias, o facultativas, según su necesidad de oxígeno (Romero, 2012).

- **Bacterias anaerobias:** Son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan son anaerobios, caracterizados por la presencia de malos olores.
- **Bacterias aerobias:** Son aquellas que necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración. El oxígeno disuelto que les sirve de sustento es el oxígeno libre (molecular) del agua, y las descomposiciones y degradaciones que provocan sobre la materia orgánica son procesos aerobios, caracterizados por la ausencia de malos olores.
- **Bacterias facultativas:** Algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto.
- **Bacterias coliformes:** Bacterias que sirven como indicadores de contaminantes y patógenos. Son usualmente encontradas en el tracto intestinal de los seres humanos y otros animales de sangre caliente. Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter* (METCALF-EDDY, 1977)



3.2.9 Condiciones de construcción de una CCM

En la Tabla 4 se presentan las condiciones necesarias o recomendadas para la construcción de una celda de combustible microbiano. Mencionando los materiales óptimos que existen hasta el momento y dan el mejor desempeño en una celda de combustible microbiana.

Tabla 4. Principales componentes y materiales utilizados en las celdas de combustible microbiana (Du et al., 2007).

Componente	Materiales	Observaciones
Ánodo	Grafito, fieltro de grafito, papel carbono, tela de carbón, Pt, Pt negro, carbono vítreo reticulado (RVC)	Necesario
Cátodo	Grafito, fieltro de grafito, papel carbono, tela de carbono, Pt, Pt negro, RVC	Necesario
Cámara anódica	Vidrio, policarbonato, plexiglás	Necesario
Cámara catódica	Vidrio, policarbonato, plexiglás	Opcional
Sistema de intercambio de protones	Membrana de intercambio de protones: Nafion, Ultrex, polietileno (estireno-co-divinilbenceno); Puente salino, septo de porcelana, o únicamente electrolito.	Necesario
Catalizador de electrodo	Pt, Pt negro, MnO ₂ , Fe ³⁺ , polianilina, mediador de electrones inmovilizado en el ánodo	Opcional



3.2.10 Ventajas de una celda de combustible microbiana

Las CCM tienen ventajas sobre otras tecnologías usadas para la generación de energía a partir de materia orgánica.

- Primero, la conversión directa de sustrato a electricidad permite altas eficiencias de conversión.
- Segundo, operan eficientemente a temperatura ambiente, incluidas bajas temperaturas.
- Tercero, no requieren del tratamiento de biogás generado en la celda.
- Cuarto, no requieren de energía extra para airear el cátodo, pues este puede ser aireado pasivamente.
- Quinto, tienen aplicaciones potenciales en lugares alejados con ausencia de infraestructura eléctrica, convirtiéndose en una opción más de energía renovable para los problemas energéticos (Alzate G. et al., 2008).

La conversión de los residuos en energía en términos de electricidad en un solo paso garantiza alta eficiencia de conversión (Rabaey et al., 2007) mostró que la conversión, la eficiencia del bioetanol, biogás y biohidrógeno es de alrededor del 10-25%; 25-38% y 15-30%, respectivamente. En comparación con esta eficiencia de conversión, CCM tiene la eficiencia de conversión tan alta como 80%. En digestión anaerobia, metano o hidrógeno.

El gas se produce junto con el dióxido de carbono y una pequeña cantidad de sulfuro de hidrógeno. A diferencia de estas tecnologías, una CCM no requiere tratamiento de gases. (Das, 2018).

3.2.11 Microorganismos en las CCM's

3.2.11.1 Microorganismos en la cámara anódica

Los microorganismos en aguas residuales pueden ser aerobios o anaerobios, estrictos u obligados, estos macroorganismos son llamados facultativos y son los mayores contribuyentes en la estabilización del agua residual.



Las investigaciones realizadas hasta el momento indican que la generación de energía eléctrica a partir de microorganismos dentro de una CCM se determina principalmente por medio de las vías metabólicas.

En altos potenciales anódicos, las bacterias pueden usar 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 su ausencia, ocurrirá la fermentación (Revelo M et al., 2013).

Como inóculo para las CCM's se pueden emplear cultivos de una especie microbiana o cultivos mixtos. En el primer caso, existe la posibilidad de modificar genéticamente la especie microbiana e interpretar de mejor forma los estudios con respecto a genómica y proteómica (Lovley, 2008). Para la especie *G. sulfurreducens* se ha investigado sobre el mecanismo de la transferencia de electrones al ánodo y su capacidad de oxidar completamente un compuesto orgánico para así contribuir efectivamente a la producción de energía (Revelo M et al., 2013).

A nivel práctico es mejor emplear cultivos mixtos porque estos generan altos potenciales y su manejo es más económico y menos exigente, por lo que se utilizan todos anaeróbicos y otras fuentes de comunidades microbianas (Du et al., 2007).

En los consorcios anódicos, las bacterias más comunes pertenecen a los géneros *Shewanella*, *Geobacter*, *Proteobacter* y *Pseudomonas*, se destacan las especies *S. putrefaciens*, *P. aeruginosa*, *G. sulfurreducens* y *G. metallireducens*. Diferentes estudios resaltan otras especies bacterianas que hacen transferencia directa o utilizan mediadores (Revelo M et al., 2013).

Las bacterias electroquímicamente activas en el ánodo de la CCM son conocidas como bacterias *anodofilicas*, las cuales transfieren sus electrones a un electrodo sin necesidad de un mediador (Saavedra, 2012). En diversos estudios han sido utilizadas cepas de bacterias puras como la *Shewanella putrfaciens*, *Escherichia coli*, *Geobacter sulfurredecens* *yrhodoferax ferrireducens*, y se ha observado que las dos últimas presentan una eficiencia coulombica de aproximadamente el 98% al



transferir los electrones al ánodo (Gámez, 2016). El desarrollo de los microorganismos depende de las condiciones ambientales, disponibilidad de nutrientes, consistencia del medio, acidez-alcalinidad, presencia o no oxígeno, grado de humedad, luz, pH, temperatura. Así mismo los microorganismos usan minerales (C, N, P y S) como nutrientes tomados del sustrato (Valdivieso, 2017).

De manera que el sustrato debe ser tal que permita que los microorganismos logren desarrollarse y cumplir con sus funciones vitales contribuyendo a la depuración del agua y a la producción energética.

3.2.11.2 Microorganismos en la cámara catódica

Actualmente se está explorando la eficacia de microorganismos que actúan sobre el cátodo y aunque en algunos casos, estos microorganismos requieren fuentes de energía adicionales para mantener su actividad biocatalítica (Rosenbaum et al., 2011), aún son desconocidos los mecanismos por los cuáles las células conservan energía y crecen como electrótrofos. En este sentido se discute sobre los aspectos conocidos hasta el momento cuando se emplean bacterias; sin embargo, también se han empleado microalgas (Mitra y Gordon, 2012) y ya se conoce un primer informe sobre la inoculación del hongo *Coriolus versicolor* en la cámara catódica que demostró que la producción de la enzima la casa por el hongo mejoró la eficiencia de reducción de oxígeno a agua y esta CCM produjo más alta densidad de potencia (Revelo M et al.,2013).

3.2.11.3 Bacteria *Geobacter*

Científicos de la Universidad de Massachusetts, en Amherst, descubrieron un organismo conocido como la especie *Geobacter*, esta bacteria obtiene su energía gracias a la oxidación de materia orgánica en descomposición para producir energía eléctrica.

Investigadores demostraron que bacterias como *Geobacter* generan electricidad por unas proteínas de la superficie celular denominadas citocromos C, además de tener proteínas especializadas facilitando así la transferencia de electrones, es una bacteria muy abundante en los sedimentos acuáticos y que presenta características muy interesantes, como son la producción de electricidad, la biorremediación de



metales pesados y la producción de estructuras denominadas pilis, que son nanocables bacterianos, estructuras eléctricamente conductoras de proteínas, cuya función es transferir electrones y se emplean como nano conductores.

De esta forma las bacterias son capaces de transferir electrones a diferentes metales, electrodos y así lograr construir una celda microbiana. Todo esto se logra gracias al proceso de óxido- reducción, de modo que al oxidar la materia los electrones se liberan.

Esta especie de bacteria es anaeróbica y emplea los metales para respirar y obtener energía eléctrica. Existen diferentes tipos de bacterias que también se pueden emplear para las CCM's sin embargo estas bacterias presentan una eficiencia inferior.

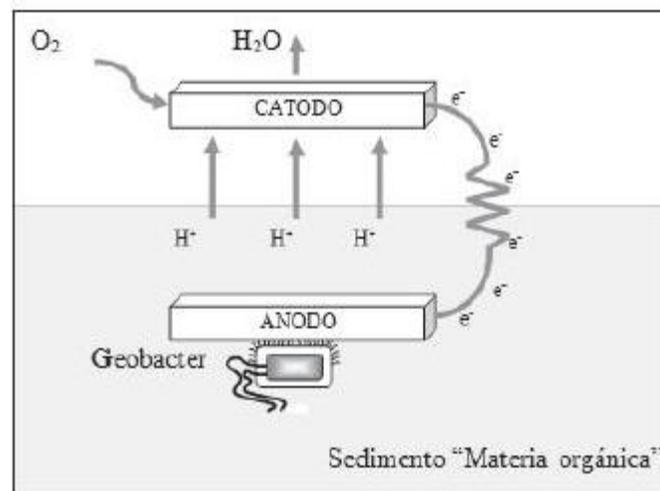


Figura 12. Funcionamiento de una CCM de sedimento. Imagen tomada de: (Romero, 2012)

Geobacter crece de forma natural en la superficie del ánodo principalmente, como se puede observar en la Figura 12, formando una membrana biológica estable. La reacción global es:





Donde el ion acetato representa la materia orgánica. Los electrones se transfieren directamente de la *Geobacter* al ánodo de grafito y después fluyen externamente hacia el cátodo de grafito siendo el oxígeno el aceptor de electrones (Chang et al., 2017).

Existen otros microorganismos del género *Shewanella*, en el que destacan las especies *Shewanella oneidensis* y *Shewanella loihica*, capaces de reducir los iones Fe^{+3} (férrico) a Fe^{+2} (ferroso), los dos estados de oxidación del hierro en la naturaleza que se encuentran en el ambiente donde se desarrollan.

S. oneidensis es una bacteria anaerobia que habita en las profundidades del océano, sedimentos y suelos, es decir, ambientes con ausencia de oxígeno.

Por su capacidad de reducir iones metálicos como el uranio, hierro, plata y manganeso recibe el nombre de *Shewanella oneidensis MR-1*, donde MR-1 hace referencia a que reducen manganeso, todos estos efectos de degradación generan en el interior de las bacterias una generación de energía eléctrica, la que favorece al sistema de una CCM.

3.2.12 Generación de energía eléctrica

El análisis de la energía eléctrica dentro de una CCM nos ayudara a estimar el voltaje generado y comprender las cualidades y debilidades del sistema, para esto se emplearán ecuaciones que nos ayudarán con el análisis y el comportamiento de la generación eléctrica.

3.2.12.1 La ley de Ohm

Describe la relación existente entre el potencial, la resistencia y la intensidad de un circuito, expresándose de la siguiente forma

$$V= IR$$

Donde:

- V =Voltaje, diferencia de potencial entre dos puntos expresado en voltios (V)
- R = Resistencia entre dos puntos en ohmios (Ω)
- I = Intensidad de corriente en amperios (A)



3.2.12.1.1 Potencia

La potencia eléctrica hace referencia al flujo de energía que es suministrada o absorbida por un elemento. Está determinada por la ley de Watt que enuncia: la potencia eléctrica es directamente proporcional al voltaje aplicado a un circuito y a la intensidad que circula por este (Skoog Douglas A., 2001).

$$P = V I$$

Introduciéndolo a la ley de Ohm resulta:

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

Donde:

- P = Potencia eléctrica existente en un circuito y se mide en watts (ω)
- V = Voltaje en voltios (V)
- I = Corriente eléctrica en amperios (A)
- R = Resistencia en ohms (Ω)

En el circuito eléctrico, la potencia es el trabajo producido por el desplazamiento de las cargas en la unidad de tiempo, en este sentido tendremos que es la cantidad de energía generada o transformada en la unidad del tiempo. La potencia eléctrica es expresada en watts (ω) (Skoog Douglas A., 2001).

El desempeño eléctrico dentro de las CCM's se estudia partiendo de las mediciones de voltaje realizadas a cada CCM, se puede evaluar el comportamiento eléctrico de estos dispositivos, los parámetros que se analizan son la densidad de potencia (DP), la eficiencia coulombica (EC) y la resistencia interna (RI) (Revelo M et al., 2013).

3.2.12.1.2 Densidad de potencial (DP)

Es expresada como la potencia por unidad de área del electrodo ánodo o la potencia por unidad de volumen del sustrato. Se define por unidad de área W/m^2 o watts por metro cuadrado, esto para determinar cuanta energía se puede producir en un volumen de agua predeterminado.



Se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$DP = \frac{(V_{Gen})^2}{R * A} = (\text{mW/m}^2)$$

Donde:

- DP = Densidad de potencia
- V Gen = Voltaje generado mV
- R = Resistencia externa siendo en este caso de 1kΩ
- A = Área del electrodo m²

3.12.2.1.4 Eficiencia coulombica (EC)

La eficiencia coulombica (EC) es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir de un sustrato determinado. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes CCM's. La EC se calcula como la razón entre la carga generada y la carga teórica presente en el sustrato de la cámara anódica (Sharma y Li, 2010), mediante la siguiente expresión matemática (Luo et al., 2010):

$$EC\% = \frac{U_i t_i}{R F b \Delta S V} M * 100$$

Donde:

- U_i = Es el voltaje de la CCM
- t_i = Tiempo de la CCM
- R = Es la resistencia externa
- F = Es la constante de Faraday (96485C/mol)
- b = Es el número de moles de electrones producidos por un mol de demanda química de oxígeno (DQO)
- ΔS = Es la concentración removida de DQO (g/L)
- V = Es el volumen del líquido (L)
- M = Es el peso molecular del oxígeno (32g/mol)



En otras investigaciones realizadas para CCMs, (Min y Logan, 2004) utilizaron acetato como sustrato obtuvieron eficiencias de 65 % y 63 – 78 % en la investigación de (Oh et al., 2004). Según los autores (Rabaey et al., 2003) con glucosa, la eficiencia coulombica fue de 89% empleando hexacianoferrato de potasio en su cátodo, mientras que Liu y Logan obtuvieron 40-55% empleando una membrana de intercambio protónico (PEM) y 9 - 12 % sin el uso de membrana, pero utilizando un cátodo de aire, observando que la mayor desventaja de este sistema fue la pérdida de sustrato debido a la oxidación aerobia en el ánodo, es decir, en la ausencia de una PEM existe una mayor difusión de O₂ de la cámara del cátodo al ánodo. Con el uso de aguas residuales las eficiencias fueron de 3-12% por los autores (Liu et al., 2004), la eficiencia obtenida con el uso de proteínas fue de 6% según (Heilman y Logan, 2006) y, finalmente, empleando lactato y ferrocianuro de potasio como sustrato la eficiencia fue de 2.4% (Ringeisen et al., 2006).

3.2.13 Plantas acuáticas

La implementación de plantas acuáticas dentro de las CCMs es una idea que surgió del proceso fotosintético que presentan los organismos ya que, en este proceso se aprovecha la obtención de energía adicional y mejora el sistema de una CCM además de contar con una amplia adaptabilidad. Al ser organismos vivos combaten el CO₂ presente y así contribuyen en la lucha del efecto invernadero.

Las plantas tienen la capacidad de producir materia orgánica a partir de su proceso fotosintético, generando hasta un 70 % de materia orgánica la cual se encuentra en la parte inferior de la CCM, la materia orgánica se puede presentar como: raíces muertas, lisados, mucilagos y exudados. La materia orgánica generalmente es oxidada por bacterias que se encuentran en los alrededores de las raíces, liberando CO₂, protones y electrones. Los electrones son donados por las bacterias al electrodo de una celda de combustible microbiana para ser aprovechados (Helder, 2012).



Se conocen muy pocos datos sobre el uso de plantas dentro de las CCM's, sin embargo, el tenerlas ayudarían en su desempeño y se lograría la obtención de otros productos, como los biocombustibles, esto se logra a partir del contacto directo del agua residual y de algunas especies de plantas acuáticas, ya que las plantas acuáticas aprovecharan los nutrientes que se encuentren en el ecosistema.

3.2.13.1 Planta acuática *elodea canadensis*

Elodea canadensis es un género de planta acuática y forma parte de la familia *Hydrocharitaceae*. Es una planta también conocida como elodea o yana. La elodea vive bajo el agua, salvo sus pequeñas hojas que flotan encima del agua, unidas a la planta por sus tallos. Los sedimentos limosos y el agua rica en nutrientes favorece el crecimiento de la elodea ayudándola a crecer en un amplio rango de condiciones desde muy sombreados hasta agua profunda y en muchos tipos de sedimento (Sanz E, et al. 2004).

➤ Características

Las plantas Elodea crecen en una amplia variedad de hábitats como estanques, ríos y lagunas de preferencia de agua fría o con temperaturas moderadas. Ya que las aguas cálidas provocan que la planta vaya degradándose hasta desaparecer.

Está constituida por hojas de color verde oscuro, que crecen alrededor del tallo en verticilos (círculos) de tres u ocasionalmente 4 a lo largo del tallo.

➤ Condiciones acuáticas

Requiere de aguas templadas para no marchitarse. Temperatura entre los 15° C y los 22° C siendo el valor óptimo es cercano a 20°C. Aunque en climas de alta temperatura acepta una temperatura de 25 °C.

La Elodea es una especie de zonas templadas adaptada a acuarios de agua fría y a tanques tropicales de temperaturas moderadas. Aparte de eso es poco exigente



con las condiciones acuáticas, pudiendo sobrevivir en ambientes con poca iluminación y falta de nutrientes (Sanz E, et al. 2004).

➤ **Cuidados**

Para su correcto mantenimiento es preferible el abonado con CO₂. Adicionalmente requiere fertilizantes ricos en hierro que absorberá a través de las hojas ya que las raíces sólo son empleadas como agarre al sustrato.

Su reproducción se presenta cuando las plantas que crecen en cursos de agua templados producen un brote en la punta de sus tallos que cae. Así es como pasan el invierno. Una vez que regresan las temperaturas favorables, este brote germina y crece en una nueva planta.

No requiere condiciones particulares en aguas neutras o alcalinas, cuyo pH oscile entre 7 y 8,5. Sin embargo, acaba muriendo y pudriéndose en medios ligeramente ácidos. Prefiere aguas de dureza media alta, superior a 15 DH y tolera una ligera salinización del medio por lo que se tiene que estar atento de pH para mantener la calidad de la planta en buenas condiciones.

El agua dura es aquella que posee una alta concentración de minerales, generalmente sales de magnesio o calcio, aunque también los compuestos de azufre y el hierro pueden contribuir a dicha dureza lo que hace el tipo de agua ideal para la planta elodea.

Se eligió la planta elodea por ser oxigenadora, por tener una su resistencia y rusticidad, unida a su abundancia favorable dentro del sistema y que será utilizada para proveer energía eléctrica (Catalogo español de especies exóticas invasoras, 2013).

3.2.13.2 *Microalga Spirulina*

La especie de microalgas son microorganismos unicelulares que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis. Son capaces de generar biomasa orgánica a partir de CO₂ y luz, usando al agua como dador de electrones y oxidándola a O₂. Además de presentar la generación de lípidos dentro de su estructura, por lo que



se consideran con potencial para la obtención de biocombustibles de tercera generación.

En la literatura consultada, los autores concluyen que aunque el comportamiento de las microalgas ante condiciones de estrés fisiológico es variable entre especies; la limitación de nutrientes especialmente nitrógeno y fósforo, asociado al crecimiento heterotrófico o a altas intensidades luminosas en fototrofia se consideran como las estrategias más eficientes para incrementar el contenido de lípidos en las microalgas, en particular de triglicéridos constituidos por ácidos grasos saturados y monoinsaturados, ideales para la producción de biodiesel (García, 2014).

➤ Cultivo de Microalga Espirulina

Para el cultivo de microalga dependerá de un suministro de carbono como puede ser el CO_2 y de una fuente de luz para realizar el proceso de fotosíntesis. La agitación de las microalgas es necesario para evitar la sedimentación celular y para asegurar su exposición uniforme a la luz y a los nutrientes, además de favorecer el intercambio de gases entre el medio de cultivo y el medio externo. Un mezclado inadecuado, reduce la productividad de biomasa y puede ocurrir muerte celular o fermentación del cultivo (Arias, et al., 2013).

La espirulina es una cianobacteria alcalófila que de acuerdo con la botánica es perteneciente a las microalgas, crece de manera natural en lagos salados alcalinos secuestrando el CO_2 de la atmosfera y nutrientes inorgánicos disueltos en agua, produciendo así O_2 y una biomasa rica en fitonutrientes (Hernández, 2014).

➤ Reproducción

Debido a su simple ciclo de vida, las microalgas llevan a cabo su reproducción por fragmentación de los tricomas maduros a través de la lisis de células múltiples especializadas. Cada célula individual se divide en dos cada 7 horas, en condiciones teóricamente ideales. Ya en condiciones reales presentan una duplicación de su población en tan solo 24 h.

➤ Nutrición del cultivo



La espirulina necesita de una fuente de nitratos fijos y carbono. Es un organismo mixotrófico, y por tanto puede obtener el carbono tanto de fuentes inorgánicas, como de fuentes orgánicas (azúcares).

Las otras moléculas de CO_2 reaccionan con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido se disocia en iones bicarbonato HCO_3^- y iones H^+ . Los iones bicarbonato pueden disociarse y dar carbonato CO_3 , según el pH de la solución (Hernández, 2014).

➤ Temperatura

La temperatura para un crecimiento óptimo depende de la variedad de espirulina. Habitualmente la temperatura ideal se encuentra en los $37\text{ }^\circ\text{C}$. El crecimiento empieza a partir de los $15 - 20\text{ }^\circ\text{C}$ y dentro del rango de los $20 - 42\text{ }^\circ\text{C}$ la espirulina experimenta un rápido descenso productivo hasta alcanzar una temperatura que llega a dañar las células y desnaturalizar las proteínas que provocan la muerte de éstas.

Entre los 16 y $29\text{ }^\circ\text{C}$ crece a un ritmo regular, debajo de $15\text{ }^\circ\text{C}$ no muere, pero es una temperatura muy fría para que pueda crecer. A esta temperatura es importante mantenerla con bastante sombra y agitación. Existe el peligro de muerte si el cultivo se encuentra a menos de $12\text{ }^\circ\text{C}$ y recibe iluminación solar directa.

La correcta iluminación garantiza que la espirulina pueda realizar la fotosíntesis debido a la gran cantidad de pigmentos que posee logrando absorber longitudes de onda.

➤ Agua

La cantidad de agua necesaria para el cultivo de espirulina es muy poca, ya que, una vez alcanzado su funcionamiento óptimo, es necesario sólo reemplazar las pequeñas pérdidas de agua por evaporación.

La presencia de distintos pigmentos fotosintéticos del alga espirulina (ficocianina, clorofila, carotenos) permite que la espirulina pueda aprovechar una gran variedad de espectros de la luz.

Se ha encontrado que la espirulina aprovecha un máximo alrededor del 20% del total de irradiación. Considerando que los cultivos expuestos a luz solar son más



resistentes a fotoinhibición y que ésta también puede ser afectada por otros parámetros de crecimiento como la temperatura, radiación UV, pH, entre otros.

➤ Diseño del estanque

Uno de los factores más influyentes en el éxito del cultivo de microalgas en el exterior es la construcción de un adecuado contenedor, el cual debe ser eficiente, fácil de operar, durable y barato. Por lo tanto, el tamaño, la forma, el material usado para la construcción y el tipo de agitación empleado cambiarán dependiendo de las condiciones locales.

Uno de los principales aspectos a considerar dentro de un estanque para albergar microalgas, es la agitación debido a que es necesaria para repartir iluminación al cultivo, para repartir los nutrientes entre todas las células del cultivo y para prevenir que la espirulina se acumule por flotación en la superficie.

Esta actividad puede realizarse mediante una bomba de aire, una cabeza de poder, un motor eléctrico conectado con una hélice o un mecanismo manual. Aunque es recomendable el uso de un interruptor temporizador, que ponga en marcha la agitación en los momentos de máxima irradiación para evitar la muerte del cultivo.

Existen dos tipos de cultivos, los sistemas cerrados y los sistemas abiertos, cada uno cuenta con sus propias ventajas y desventajas según sea la aplicación (Santos, 2014).

➤ Sistemas de cultivo abierto

Los sistemas de cultivo abierto se clasifican por ser sistemas en contacto con el medio ambiente, estos pueden ser estanques, lagunas, lagos o estanques artificiales. La única condición que se requiere es que tenga una iluminación adecuada, que tenga agua y CO₂ para que el cultivo se pueda desarrollar satisfactoriamente. La ventaja de utilizar estos sistemas es que no representa un costo elevado en su construcción. Sin embargo, su control es más complicado ya que al estar en contacto con el medio ambiente se puede contaminar y reducir la eficiencia de reproducción. Los sistemas artificiales poseen una mejor eficiencia debido a que se tiene un mejor control y se combaten los posibles riesgos de



contaminantes que pueden afectar al cultivo de microalgas dentro de esto destacan los sistemas raceway que son los más empleados debidos a su fácil construcción y bajo costo.

Los raceway son dispositivos en los que se puede obtener una agitación y mezcla dentro del mismo facilitando el intercambio de gases. Cuenta con una rueda de paletas que genera una circulación de flujo constante, un ejemplo está en la Figura 13, donde se logra observar un raceway (González, 2016).



Figura 13. Vista aérea de diferentes tipos de raceways en Cajamar tomada de: (González, 2016)

➤ **Sistemas de cultivo cerrados**

Dentro de los sistemas cerrados se encuentran los fotobiorreactores que son un sistema totalmente aislado logrando tener un cultivo de organismos foto autótrofos en el que la proporción de luz no invade directamente la superficie del cultivo, sino que pasa a través de una pared transparente antes de alcanzar las células cultivadas.

No permite el intercambio de gases y la entrada de contaminantes como polvo, entre el cultivo y el ambiente. Los fotobiorreactores tubulares, además, tienen partes separadas para la captación de la luz y para la desgasificación, por lo que permiten optimizar ambas funciones a cambio de un costo mayor que puede ser compensado por una mayor productividad. En la Figura 14 se puede observar la imagen de fotobiorreactor (Hernández, 2014).



Figura 14. Fotobiorreactor tubular ubicado en Cajamar (González, 2016)

➤ **Microalgas como fuente de lípidos para la obtención de biodiesel**

El interés en las microalgas para la producción de biodiesel se debe a su alto contenido de lípidos en algunas especies y al hecho de que la síntesis de estos, especialmente de triglicéridos (TG) no polares (que son el mejor sustrato para la producción de biodiesel), puede ser manipulada por cambios de las condiciones de cultivo. Adicionalmente, las microalgas poseen algunas ventajas, entre las que se pueden mencionar:

- Posee mayor eficiencia fotosintética dentro de las plantas
- Tasa de crecimiento elevado, duplicando su biomasa en tan solo 24 horas
- Capaces de mitigar grandes cantidades de CO₂

Se adapta a los diferentes medios donde se encuentre por lo que solo necesita luz del sol y algunos nutrientes.

Capacidad para utilizar los nutrientes de aguas residuales en su crecimiento (especialmente nitrógeno y fósforo) (Xin et al., 2010), podría disminuir el costo del medio de cultivo y evitar la descarga de estos nutrientes a cuerpos de agua. (Arias, et al., 2013)



Las microalgas bajo condiciones normales de cultivo presentan un contenido de lípidos que por lo general varía entre el 20 y el 50 % de su peso seco. Sin embargo, cuando son sometidas a situaciones de estrés, frecuentemente incrementan su fracción lipídica, por lo que se han reportado valores en rangos más amplios (Santos,2014).

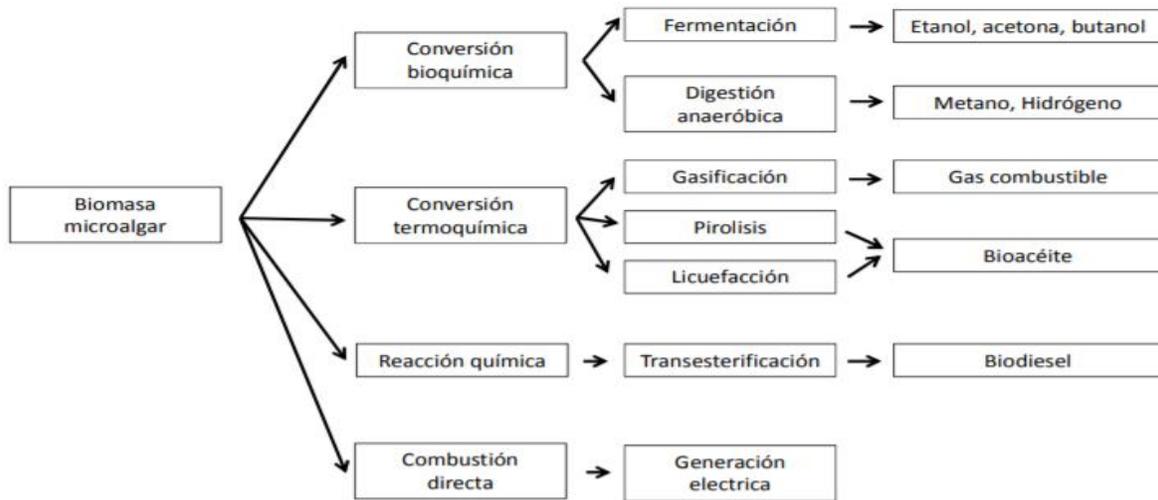


Figura 15. Procesos de producción de energía usando biomasa microalgas.

Imagen tomada de (García, 2014)

➤ **Etapas para la producción de biodiesel a partir de microalgas**

El proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas se observa en la figura 16, se inicia con el cultivo de la cepa para la obtención de biomasa con una alta productividad de lípidos, seguido de la separación de la biomasa del medio de cultivo y posterior extracción de los lípidos para finalmente obtener el biodiesel por una reacción de transesterificación, de forma similar a como se produce a partir de cualquier aceite vegetal (Hernández, 2014).

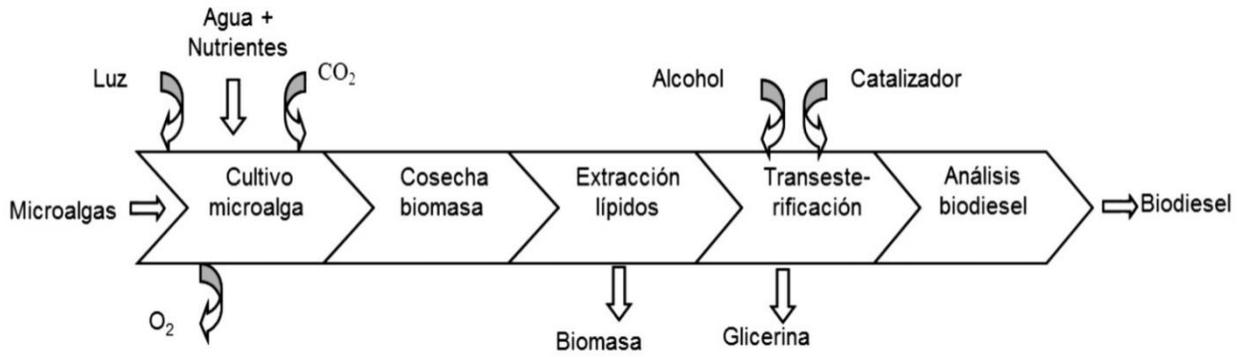


Figura 16. Etapas del proceso de obtención de biodiesel a partir de microalgas. Imagen tomada de: (Arias, et al., 2013).



Capítulo 4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de plantas acuáticas en celdas de combustible microbiana para la generación de energía eléctrica.

4.2 Objetivos particulares

- Evaluar el efecto que generan las plantas acuáticas en celdas de combustible microbiana.
- Diseñar, Implementar y evaluar un prototipo de celda de combustible microbiana para la producción de energía.
- Conocer la eficiencia de operación de la celda de combustible microbiana y determinar su viabilidad como medio de generación de energía eléctrica.



Capítulo 5. Hipótesis

Con el uso de plantas acuáticas en la CCM se espera mejorar el nivel de producción de energía eléctrica, así como en el tratamiento de aguas residuales y la generación de biomasa.

Con la aplicación de este prototipo se busca crear conciencia del daño causado al planeta con los residuos generados y aportar una opción para disminuir los estragos causados al medio ambiente. Una alternativa para reducir estos residuos es implementar el sistema de celdas de combustión microbianas en cada vivienda, así se generaría energía eléctrica y al mismo tiempo se utilizarían las aguas residuales domésticas como alimento para las celdas, esto ayudaría a reducir la carga de materia orgánica que presentan las aguas residuales y así contribuir con el tratamiento de aguas de cada región.



Capítulo 6. Metodología

Para abordar en cada uno de los objetivos propuestos y conseguir el objetivo general planteado, se estableció la metodología de trabajo descrita en la Figura 17.

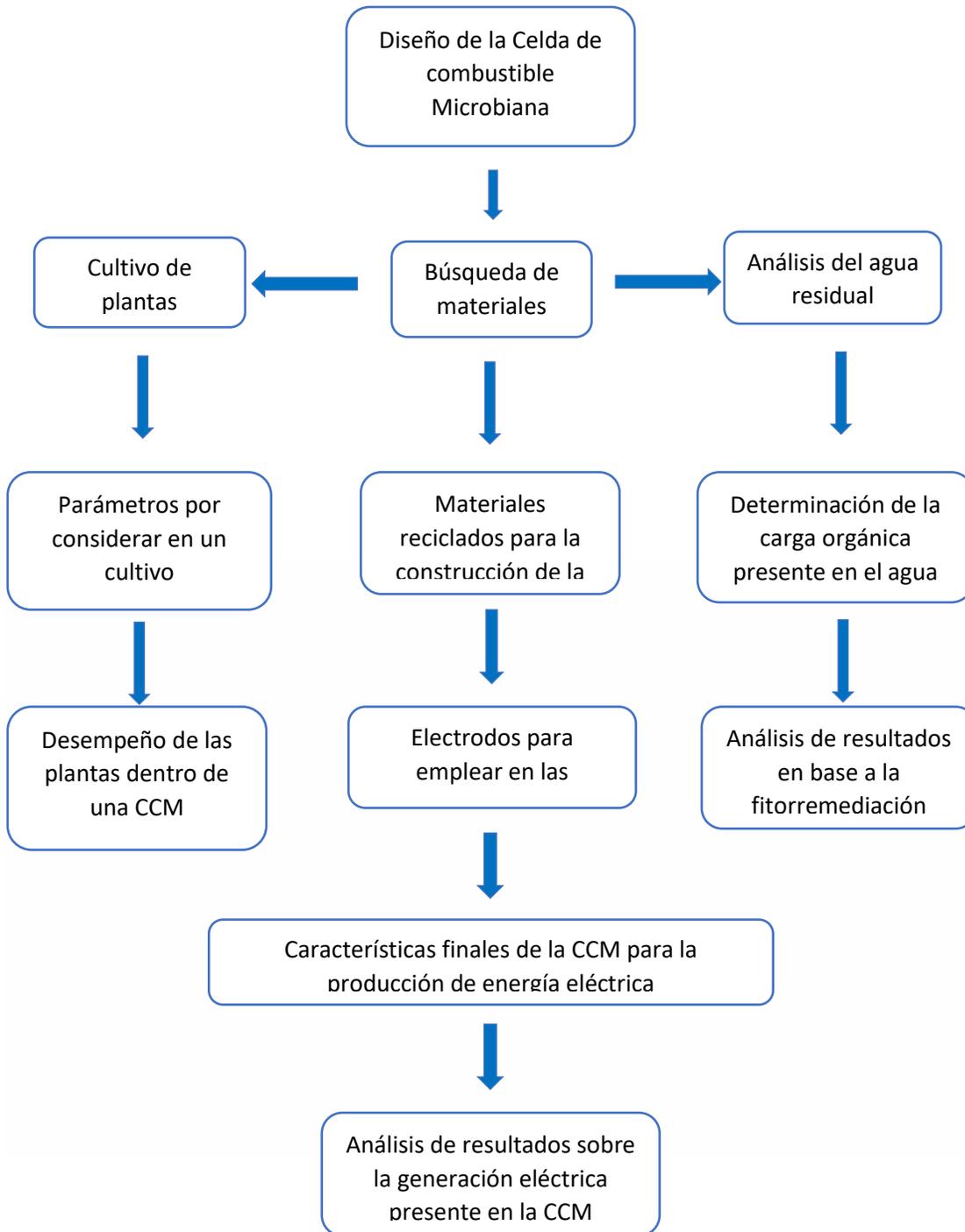


Figura 17. Esquema de la metodología



La **primera** parte de la investigación fue la búsqueda de información bibliográfica sobre el funcionamiento y comportamiento de una celda de combustible microbiana para identificar el prototipo físico que mejor se adapte al proyecto.

La **segunda** parte fue el diseño de una CCM, así como la determinación de materiales a utilizar en la construcción. Seleccionando materiales reciclados apropiados a las condiciones físicas que debe tener una CCM.

La **tercera** parte fue el levantamiento de un cultivo de plantas acuáticas que se utilizan en la cámara catódica de este sistema. Para tener el cultivo en buenas condiciones, tomando en cuenta las siguientes acciones: pH y temperatura para así determinar un punto de operación que permita obtener la máxima fijación de CO₂ posible a la especie seleccionada.

La **cuarta** parte consistió en la experimentación sobre la generación de energía eléctrica, monitoreando los distintos prototipos y verificando el correcto funcionamiento de cada uno, ajustando el diseño de los electrodos, la distancia de los electrodos, analizando si la cantidad de plantas que se requieren es un factor importante en la generación de energía eléctrica y se monitorearon los resultados obtenidos.

Como fase final se realizó la recopilación de los resultados obtenidos en el estudio para evaluar el uso de las CCM's. Analizando la producción de energía eléctrica generada y un análisis completo de las variantes de cada elemento que se modificó en cada prototipo para a conocer que diseño es el que proporcione un mejor rendimiento.



6.1 Desarrollo experimental

La construcción de las CCM's se realizó dentro de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria (UIM) en la Facultad de Estudios Superiores Acatlán y en la planta de tratamiento de agua residual de la misma Facultad.

Para obtener el modelo de una celda de combustión microbiana (CCM) se buscó información de electroquímica, la base del proceso de generación de energía eléctrica, en investigaciones previas al uso de CCM's se destaca que los elementos más utilizados son los electrodos de grafito y se utiliza agua residual como sustrato, por lo que se tomaron en consideración estos materiales. Adicionalmente se buscó la forma de generar energía eléctrica con materiales reciclados y plantas acuáticas que podrán utilizarse para biocombustibles.

6.2 Desarrollo de celdas de combustible microbianas

Para el diseño de los prototipos se contemplaron diversos materiales para su construcción, los cuales debían contar con las siguientes características: ser de un material transparente, resistente y con una buena durabilidad. Los materiales más recomendables fueron: vidrio, acrílico y plásticos para la construcción de las cámaras de la celda, con el propósito de realizar un proyecto que ayudara al medio ambiente se optó en emplear materiales reciclados. Las botellas de PET fueron la opción más apropiada a utilizar como cámaras anódica y catódica, como puente de intercambio por su fácil acceso y disponibilidad se utilizaron mangueras de PVC y tubos de plástico, pero también se pueden utilizar tubos de cristal.

Los electrodos que se utilizaran deben poseer ciertas características como: elementos resistentes a la oxidación, ser buenos conductores de electricidad, que no tengan cambios en su estructura y que sean fáciles de conseguir, los materiales recomendables son: grafito, oro, platino, acero inoxidable y aluminio.

Para el correcto funcionamiento de una CCM esta tiene que contar con una toma de oxigenación apropiada para el suministro de CO₂ y alimentar a la planta acuática, para esto se adaptó una toma de aire que suministra a las plantas acuáticas además de ayuda con el proceso de bioelectrogénesis.



En la Figura 18 se muestra una breve explicación del proceso de generación eléctrica que se lleva a cabo dentro de una CCM, esto ocurre debido a la descomposición del carbono orgánico o inorgánico por bacterias se combina con la liberación de electrones extracelularmente hacia los electrodos, que generan corrientes eléctricas. Los electrones liberados por el microbio son transferidos por enzimas biocatalíticas o compuestos, reducción-oxidación activos de la célula al ánodo en presencia de una fuente de carbono viable. Esto crea una corriente eléctrica a medida que los electrones se mueven del ánodo a un cátodo físicamente separado.

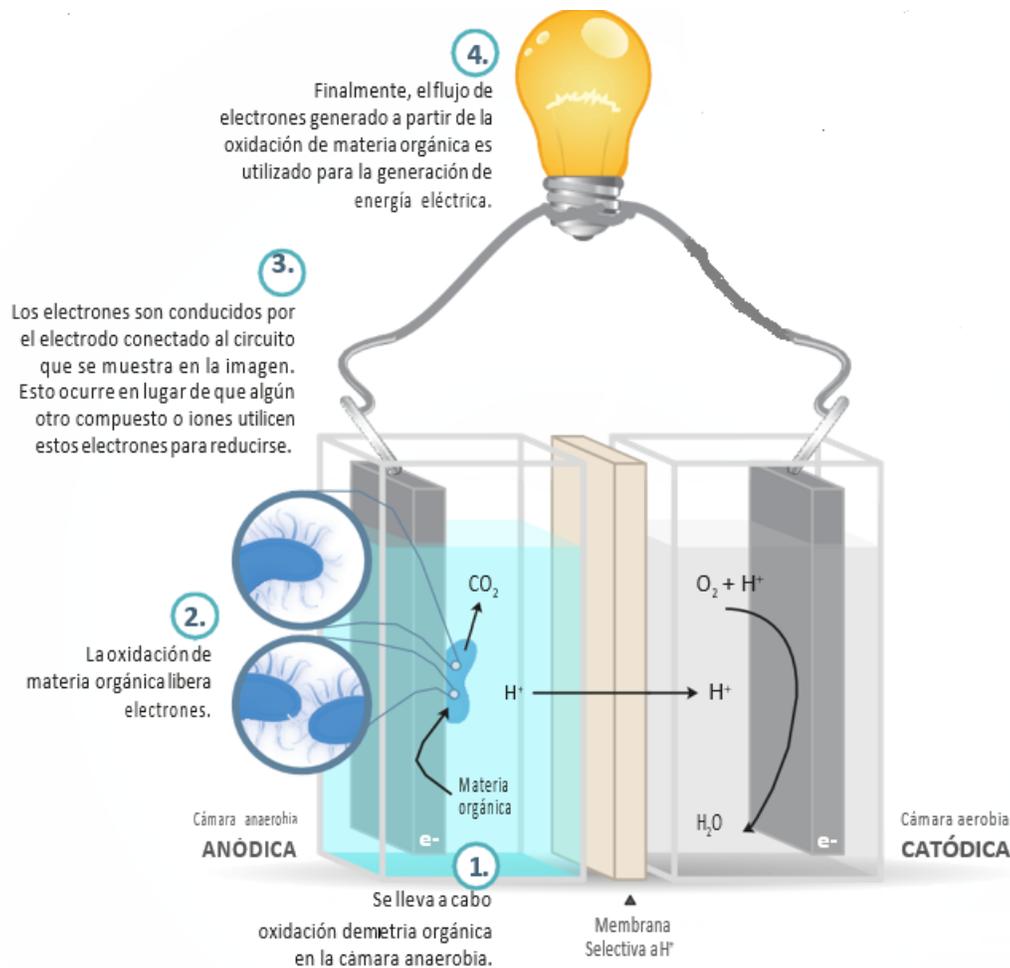


Figura 18. Proceso de bioelectrogénesis. Imagen tomada de: (Mohn, E., 2017)



6.3 Construcción de las Celdas de combustible microbianas

Para el diseño de las celdas de combustible microbiana se propusieron materiales reciclados (botellas PET), la CCM tuvo un diseño de tipo H por lo que se tuvo dos cámaras, una anódica y otra catódica ambas constituidas por botellas de PET. El primer paso del proceso fue la recolección de las botellas de PET dentro de la FES Acatlán, así como la búsqueda de los materiales faltantes para dar inicio con el primer prototipo.

En los primeros diseños de las CCM's se utilizaron dos botellas de plástico de 1.5 litros de capacidad, las botellas se lavaron y se desinfectaron para evitar contaminantes que pudieran afectar en el desempeño de la celda. Las botellas que se utilizaron para cada CCM fueron del mismo tamaño y volumen, con la finalidad de no ejercer un diferencial de presión dentro del sistema, en las botellas se realizó una perforación para introducir el puente de intercambio. Se utilizó cúter y tijeras para realizar una perforación en un costado de cada botella a la misma altura como se puede observar en la Figura 19, logrando conectar ambas botellas por medio de una manguera o tubo de PVC, la cual tendrá la función ser el puente de intercambio entre ambas cámaras.



Figura 19. Corte de botella para introducir el puente de intercambio iónico.



Una vez que las botellas estuvieron recortadas y limpias, se colocó un tubo de plástico (que representara al puente de intercambio iónico) para unir las dos botellas utilizando silicón líquido para pegarlas Figura 20, posteriormente se dejó secar por 24 horas. Antes de utilizar la CCM se llenó de agua para verificar que no contara con algún tipo de fuga y corroborar el funcionamiento apropiado de cada celda.



Figura 20. Unión de botella con puente de intercambio iónico

En el diseño de la CCM se adiciono una conexión de oxígeno en la cámara catódica empleando una manguera con un diámetro de 0.5 cm, con la finalidad de alimentar a las plantas acuáticas con CO_2 , para realizar esto se tomó una extremidad de la manguera que va en el interior de la celda, se aplicó calor para ser sellada y ser perforada con una aguja para la liberación pasiva de CO_2 . La colocación de las mangueras se realizó de dos formas: la primera solo consistió en colocar la manguera de oxigenación por la parte superior donde sería la entrada del electrodo como se muestra en la Figura 20 y la otra conexión fue en la parte inferior donde se realizó una perforación en la botella de PET a 2 cm de altura donde se introdujo la manguera y se selló para evitar fugas.

Los electrodos de grafito se introdujeron con alambre de cobre saliendo por la parte superior de las botellas para ser sujetos, con ayuda de una perforación en el



centro de los taparrosas de cada botella facilitando el acceso para tomar el voltaje de salida de cada CCM.

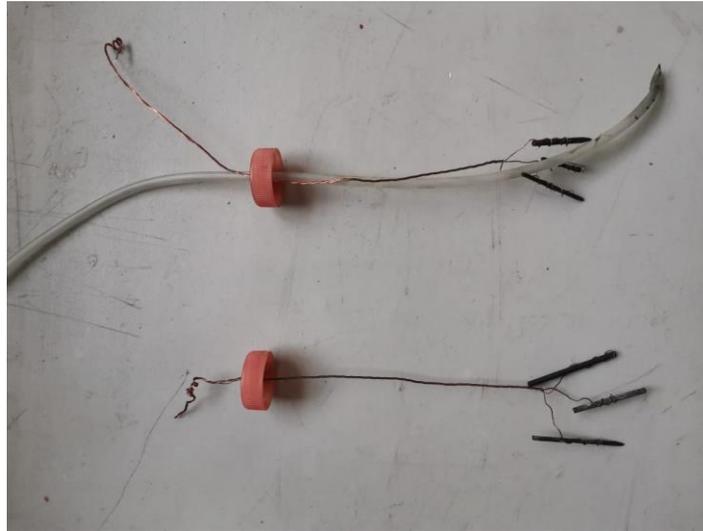


Figura 21. Electrodo de grafito unidos con alambre de cobre

Para la separación de cámaras se introdujo algodón dentro del puente de intercambio iónico como se muestra en la Figura 22 quedando lista para agregar el sustrato y la planta acuática en su cámara correspondiente.



Figura 22. Representación final de una CCM

Una vez determinados los materiales a utilizar en las CCM's se preparó la cantidad necesaria de sustrato (agua residual) para cada celda microbiana, el sustrato es



extraído de la planta de tratamiento de la FES Acatlán que será introducida en la cámara anódica.

La cámara catódica se llenó con agua cruda con una planta acuática *elodea canadienses*, se muestra en la Figura 23. Ambas cámaras se llenaron con 1L de agua, cada celda se conectó con el suministro de oxígeno de la cámara catódica y se dejó sobre una base de madera, la cual fue construida en forma de escalera conectada con dos lámparas para ayudar con el proceso fotosintético de las plantas acuáticas.



Figura 23. Planta acuática *elodea canadienses* utilizada en las CCMs

El objetivo de trabajar con estos primeros modelos fue para conocer el funcionamiento y rendimiento de este primer prototipo de una CCM, así como analizar su comportamiento electroquímico que se llevan a cabo dentro de la celda microbiana.

Una vez observado el comportamiento y analizando el funcionamiento del prototipo, se comenzó a construir varias celdas con estructura tipo H, los diseños tuvieron distintas variables con la finalidad de obtener un diseño final con los parámetros ideales para cumplir con el objetivo de la investigación. Algunas de las características fueron, colocar el puente de intercambio de protones a diferente altura, con la finalidad de identificar si es un factor relevante en el comportamiento de las CCM, otra de las variantes fue el material de los electrodos entre aluminio, grafito y acero inoxidable, así como el análisis de la cantidad de carga orgánica dentro del sustrato.



6.4 Análisis de las Celdas de Combustible Microbianas

Se construyeron 9 CCM's con la finalidad de probar algunos materiales y revisar el diseño de la CCM, observando el comportamiento de cada una de las celdas y determinar en qué condiciones y porciones de materiales son las adecuadas en el desempeño de la mejor CCM.

Las celdas de combustible microbianas fueron constituidas por un ánodo con agua residual y un cátodo con planta *elodea*, unidos por un puente de intercambio en ambos casos se utilizaron electrodos de grafito conectados con alambre de cobre, en la parte del cátodo se conectó una manguera en la cual estará circula CO₂ para alimentar la planta, además de contar con iluminación para ayudar al proceso de fotosíntesis, por otro lado en el ánodo se selló completamente para que no tuviera interacción con el medio ambiente y así mantener bacterias anaerobias dentro de la cámara anódica.

Los materiales de construcción para cada una de las CCM's fueron los siguientes:

- 2 botellas de PET con un volumen de 1 litro o 1.5 litros
- 1 tubo de manguera de polímero o tubo de polímero transparente
- 1 gramo de algodón
- 2 barras de grafito como electrodos
- 60 cm de hilo de cobre
- Silicón líquido
- 1 manguera con suministro de oxígeno

En el ánodo se colocó agua residual proporcionada de la planta de tratamiento residual de la FES Acatlán y en el cátodo se agregó agua cruda con la planta *elodea canadensis*, el volumen de cada CCM dependió de las cámaras de la CCM que fueron de 1 litro o de 1.5 litros. En la Tabla 5 están las características de construcción de las 9 celdas y en la Figura 24 se esquematiza la estructura general del prototipo diseñado para la celda de combustible microbiana.

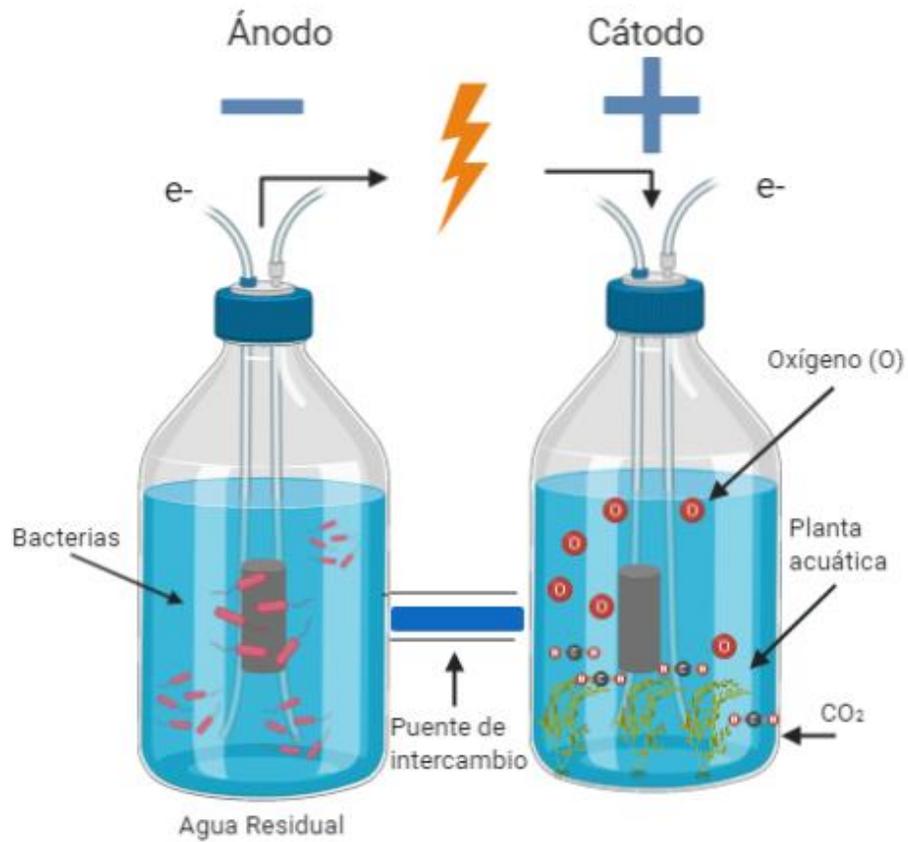


Figura 24. Prototipo general de la celda de combustible microbiana. Se esquematiza los principales componentes de un CCM, cátodo, ánodo, puente de intercambio, el grafito y la planta acuática. Imagen diseñada en:

<https://biorender.com/>



Tabla 5. Características de construcción de las CCM.

No. CCM	Ánodo de grafito (g)	Cátodo de grafito (g)	Volumen de cada una de las botellas (L)	Cantidad de planta <i>elodea canadensis</i> (g)	Material del puente de intercambio	Altura del puente de intercambio (cm)
CCM 1	0.00125	0.001	1.5	10	Manguera de PVC	11
CCM 2	0.00125	0.001	1.5	15	Manguera de PVC	8
CCM 3	0.00125	0.00075	1.5	15	Manguera de PVC	7
CCM 4	0.002	0.002	1.5	15	Manguera de PVC	13
CCM 5	0.00110	0.0011	1.5	10	Tubo de plástico	15
CCM 6	0.0009	0.00115	1	15	Tubo de plástico	10
CCM 7	0.0025	0.00125	1	15	Tubo de plástico	14
CCM 8	0.0025	0.002	1	0	Tubo de plástico	6.5
CCM 9	0.0025	0.0015	1	8	Tubo de plástico	2.5



6.4.2 Análisis de agua residual

Para el análisis del agua residual se realizó una prueba de DQO para conocer el valor de su carga orgánica con la que se trabajara en la CCM y conocer el porcentaje de degradación de la materia orgánica.

Se tomo una muestra de agua residual desde el pretratamiento en donde se remueven sólidos presentes en el agua residual por medio de rejillas dentro de la planta de tratamiento, después es llevada al laboratorio para realizar la prueba.

Como primer paso fue tomar los viales con reactivos para DQO, dentro de estos viales se encuentra una sal de cromo hexavalente de color naranja brillante y un oxidante muy fuerte. En estos viales se marcaron para identificar cada una de las muestras de agua residual, se tomaron 2 ml de agua residual para introducirlas dentro de un vial de determinación de DQO, tal como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Viales para la prueba de DQO

Una vez listo el vial se taparon perfectamente, se preparó el termorreactor modelo Orion COD165 para realizar el proceso de digestión, se ajustó a una temperatura de 150 °C por un periodo de dos horas. Una vez que el termorreactor llega a la temperatura deseada se agitaron los viales para mezclar el agua residual con el oxidante y se colocaron en las rejillas del termorreactor. Después de dos horas el termorreactor se apagó y se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos, en la Figura 26 se puede observar el termorreactor, así como el inicio del proceso con los viales para la obtención de la prueba DQO.



Figura 26. Termorreactor modelo Orion COD165 con viales preparados, para la prueba de DQO

Después de este proceso se empleó el método de colorímetro de DQO con ayuda del equipo Thermo que es un colorímetro que leyó la absorbancia de las muestras después del proceso de digestión para correlacionarlo con el DQO, equipo modelo Orion AQ3700 tal como se observa en la Figura 27, este equipo cuenta con más de 70 opciones de métodos pre-programados por lo que se ajustó a las condiciones requerida, en este caso se indicó, que se realizara la prueba de DQO de 0 - 1500 mg/l. Para utilizar el equipo se calibro con una muestra cero o en blanco, con esta lectura el equipo realizo un comparativo con las siguientes muestras arrojando el valor de DQO de cada muestra.



Figura 27. Colorímetro Thermo modelo Orion AQ3700



6.4.3 Determinación de la prueba de DBO₅

La demanda química de oxígeno (DBO) es una prueba para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica.

En la planta de tratamiento de agua residual se emplea el equipo OxiTop Box que es un armario termostático de sobremesa con una puerta abatible transparente que permite admitir como máximo 6 muestras simultáneas, este equipo tiene la capacidad de registrar un valor de DBO por día y al finalizar la prueba de 5 días arroja los valores registrados, en la Figura 28 se puede observar el equipo utilizado para realizar la prueba.



Figura 28. Equipo OxiTop Box, utilizado para obtener los valores de DBO

Para la preparación de la muestra a analizar las cantidades se tomó como referencia a la carga orgánica que puede presentar el agua residual, algunos rangos se pueden observar en la Figura 29, con estos valores se determinó el rango apropiado para realizar las pruebas de DBO₅ con un volumen de 250 ml tomando el rango entre 0 – 200 mg/L.

<i>BSB / BOD / DBO (mg/l)</i>	<i>VOLUME (ml)</i>	<i>FACTOR</i>
0 - 40	432	1
0 - 80	365	2
0 - 200	250	5
0 - 400	164	10
0 - 800	97	20
0 - 2000	43,5	50

Figura 29. Rangos de volumen en función a la prueba de DBO₅



7.1 Preparación de la muestra para DBO

Se tomo un volumen de 250 ml de agua residual, posteriormente se preparó el equipo y la muestra para la prueba.

Material utilizado:

- Frasco con su respectivo cabezal
- 1 agitador magnético
- Inhibidor de nitrificación N-Allylthiourea
- Pellets de hidróxido de sodio
- 1 pipeta
- 1 probeta con capacidad de 250ml

Para la preparación de la muestra se utilizó una probeta con volumen de 250 ml, se agregó la cantidad exacta de agua residual para analizar, tal como se observa en la Figura 30.



Figura 30. Probeta con 250 ml de agua residual para la prueba de DBO₅

La muestra fue vertida dentro del frasco junto con un agitador magnético, introduciéndolo de manera inclinada, posterior a esto se tomó el recipiente con inhibidor de nitrificación N – Allylthiourea y se agregaron 5 gotas, se colocó en la parte superior una base de plástico donde se anexaron dos pellets de hidróxido de sodio para posteriormente cerrarlo con el cabezal.



El cabezal medidor tiene, una pantalla y teclas con los cuales se configuro dentro de su interfaz. Cada cabeza de medición tiene su propio ID con el cual se podrá identificar de donde es cada muestra además de ser reprogramable. Dentro de los parámetros de la DBO se programó el cabezal medidor teniendo una duración de 5 días, los resultados se indicaron con unidades en mg/L se proporcionó el volumen de la muestra a analizar, se obtuvo un volumen final de 250 mL. En la Figura 31 se muestra la colocación de las muestras y los cabezales mencionados.

Teniendo los cabezales programados se colocaron en el frasco y se cerraron perfectamente, posteriormente se colocaron dentro del equipo OxiTop Box, para dar inicio con el encendido y sincronización del auto temporizador de cada cabezal.



Figura 31. Preparación lista de muestras, para iniciar la prueba de DBO₅

La medición en OxiTop consiste en una medición de presión en un sistema cerrado: los microorganismos que se encuentran en la muestra consumen oxígeno y generan CO₂. El CO₂ se absorbe con NaOH, creando una presión negativa que puede leerse directamente como valor de medición en forma de DBO en mg/L. Con los volúmenes de muestras empleados se regula cuánto oxígeno está disponible con lo cual se puede realizar una determinación completa de la DBO. Los resultados finales de la prueba se observaron a través de los cabezales programados y se registraron en una bitácora para la identificación de cada CCM.



7.2 Evaluación de la producción de electricidad

Para las lecturas de voltaje se utilizó un multímetro Steren modelo MUL-005, el cual se puede observar en la Figura 32, tomando las lecturas de voltaje de cada CCM, los valores se anotaron en una bitácora y así evaluar la producción de electricidad.



Figura 32. Multímetro Steren modelo MUL-005

La evaluación del voltaje se monitoreo día tras día, con la finalidad de observar la generación de energía eléctrica dentro de la CCM, el alambre de cobre se conectó al multímetro, colocando la parte negativa del multímetro en la cámara anódica, es decir, donde se encontraba el sustrato con las bacterias y la parte positiva del multímetro se colocó en la cámara catódica, en la botella donde se encontraba el agua cruda junto con la planta acuática, procedimiento que se observa en la Figura 33.



Figura 33. Evaluación del voltaje de la CCM, con ayuda de un multímetro

Los valores de voltaje de cada CCM se anotaron dentro de una bitácora para analizar su comportamiento y conocer el desempeño final de una CCM.



8.1 Cultivo de microalgas

Los parámetros más importantes que regulan el crecimiento de la espirulina son: la fuente de nutrientes, el método y la velocidad de recirculación, la salinidad del medio de cultivo, el pH, la temperatura y la iluminación para lograr mantener un cultivo de microalga estable.

8.2 Nutrición del cultivo

Las cianobacterias requieren como materia prima carbono, nitrógeno, potasio, sodio, magnesio calcio, hierro y otros micronutrientes (minerales) para crecer.

El carbono es obtenido a través del aire, fijando el CO₂ en el proceso de fotosíntesis, alimentándose y contribuyendo al mismo tiempo a fijar gases de efecto invernadero. La espirulina no puede fijar nitrógeno del aire, así que éste tiene que ser proporcionado en la mezcla nutritiva. La mezcla nutritiva se compone de macronutrientes y micronutrientes.

Los macronutrientes pueden ser a base de urea o nitratos (origen sintético), o bien a través de la orina (origen orgánico).

La orina es el alimento perfecto para la espirulina, es el más local, económico y que es absorbido con mejor rapidez puesto que tiene una relación óptima de macronutrientes (urea, nitrógeno, fósforo, cloruros, entre otros) el utilizar agua residual ayudara con la alimentación de la microalga. Y para la ausencia de hierro se puede hacer mediante el sirope de hierro (a base de sulfato de hierro) o clavos oxidados con esto se tienen todos los componentes necesarios para tener un cultivo de microalga con buena salud.

8.3 Escalonamiento de cultivo de microalga

El escalamiento se realizó en diferentes recipientes (plástico grado alimenticio), de acuerdo con la cantidad de cultivo presente como se muestra en la Figura 34.

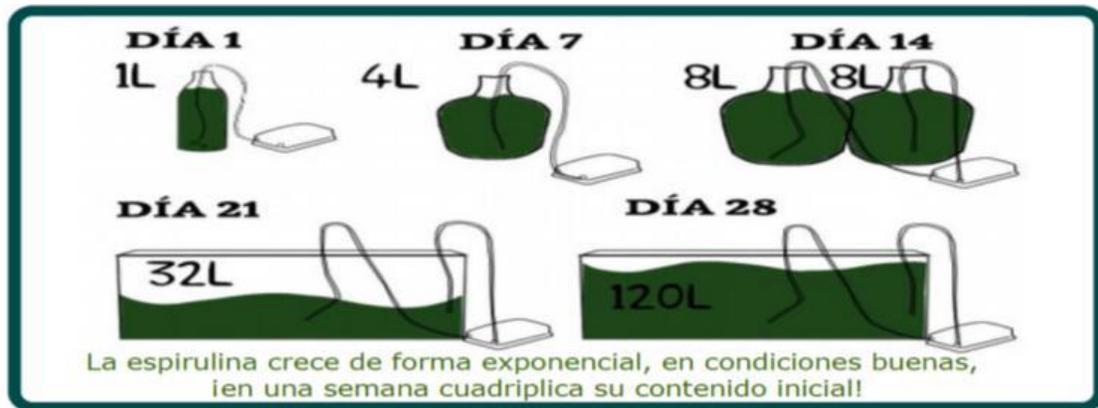


Figura 34. Días en el cultivo crece y el escalonamiento que se debe seguir tomada de ups.

Con la muestra de microalga espirulina que se compró, se realizó el escalonamiento primero en botellas de 1L después se pasaron a botellas de 3 L y por último se mantuvieron en botellas de 10 L como se muestra en la Figura 35. Con el fin de no exponer el cultivo directamente con la fuente de calor; ésta es la etapa en que el cultivo es delicado.



Figura 35. Cultivo de microalga.

El parámetro principal que permitirá saber esto es la altura del cultivo; está debe de ser de entre 10 y 40 cm. Más altura indica mayor estabilidad del cultivo, facilita la agitación y el crecimiento lento.

Menor altura indica menor estabilidad del cultivo, dificulta la agitación y promueve el crecimiento rápido.



9.1 Análisis de microorganismos

El análisis microbiológico del agua residual tiene como objetivo conocer la calidad de agua determinando los microorganismos presentes. Por este motivo se acudió a las instalaciones del IPN - Escuela Nacional de Ciencias biológicas en el departamento de microbiología, donde se realizaron análisis de microorganismos, en conjunto de Cristina Yuriko Contreras Blancas quien fue la encargada de indicarme como realizar las pruebas de identificación de bacterias y el análisis de aislamiento de bacterias.

9.2 Aislamiento de bacterias

Para la realización del aislamiento de bacterias se esterilizo el material utilizado y se preparó una porción de agar nutritivo, se requiere de 23 g del medio en un litro de agua destilada. Sin embargo, para la prueba solamente se requirió una porción de agar nutritivo de 80 ml, calculando la cantidad necesaria.



Figura 36. Balanza AQT, primer paso para la obtención del agar nutritivo

Por lo que se utilizó 1.84 g de agar nutritivo, pesado en una balanza analítica como se observa en la Figura 36, posteriormente se agregó en un matraz con 80 ml de agua destilada, se agito hasta desvanecer los grumos presentes, se tapó el matraz para ser calentado con ayuda de una autoclave con una temperatura de 121 °C para disolver el medio por completo, en la Figura 37 se puede apreciar la autoclave utilizada para disolver el agar y esterilizar el medio.



Figura 37. Autoclave utilizada para el procedimiento

9.3 Preparación de placas

Obtención de placas de agar nutritivo para llevar a cabo el método se debe contar con un área estéril para no contaminarlas con alguna bacteria y para tener una esterilidad en el ambiente, se utilizó un mechero encendido colocando 5 placas, a las cuales se les vertieron 16 g de la solución ya preparada en el matraz de agar nutritivo en cada una de las placas, se dejó homogenizar y se introdujeron en una incubadora a 37 °C por 24 horas.

9.4 Aislamiento de Bacterias por dispersión de superficies

En todos los ambientes naturales habitan múltiples microorganismos de diversos tipos y actividad fisiológica. Para efectuar el estudio de un organismo particular es necesario separarlo de la población mixta en la que se encuentra. Se emplearon técnicas de aislamiento que conduzcan a la obtención de un cultivo puro. De manera general los métodos de aislamiento incluyen:

1. Separación física de los microorganismos mediante:

Diluciones seriadas y siembra por vertido en placa.

Siembra por agotamiento.

2. Utilización de medios de cultivo selectivos y diferenciales.



3. Aprovechamiento de características particulares de los microorganismos, tales como la formación de esporas, el metabolismo anaerobio y/o facultativo, la capacidad para utilizar sustratos poco comunes, etc.

Para esta prueba se utilizaron las placas con agar nutritivo las cuales se dejaron previamente en la incubadora, se acondicionó la mesa de trabajo la cual debe estar desinfectada y se encendió el mechero.

Dilución de la muestra

Se tomaron 10 ml de muestra de agua residual y en condiciones asépticas se vació en un matraz Erlenmeyer con 90 ml de agua peptonada para obtener la primera disolución que fue 10^{-1} . Este frasco se cerró y se agito por 7 segundos con 25 movimientos con un ángulo de 90° , tal como se observa en la Figura 38 el método de dilución de la muestra.



Figura 38. Método dilución de la muestra en tubo

Se homogenizo y a partir de esta suspensión preparo 2 diluciones decimales más (10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4}), para ello se emplearon dos tubos con 9 ml de agua peptonada cada una.

Se tomo 1 ml de esta dilución y transferido a un tubo con 9 ml de agua peptonada (marcar el tubo como dilución 10^{-2}). Se agito por 7 segundos con 25 movimientos.



Del tubo marcado 10-2, tomar 1 ml y se transfirió a otro tubo con agua peptonada (marcar como dilución 10-3). Se agito por 7 segundos con 25 movimientos. Se repitió el procedimiento con la dilución 10-4, tal como se observa en la Figura 39.

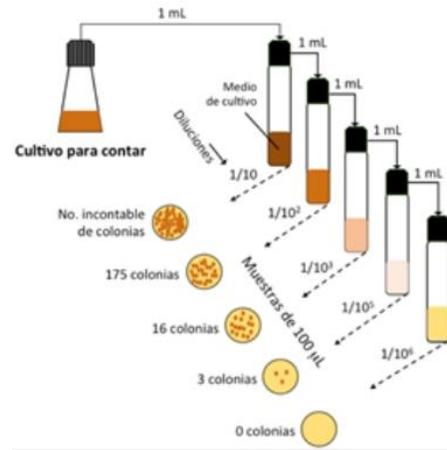


Figura 39. Técnica de disolución y cuenta en placa

Del tubo control y de cada dilución (partiendo de 10^{-2}) se tomaron 0.1 ml con la micropipeta y se pasaron a una de las cajas de Petri con medio agar nutritivo con el nombre de la dilución.

Se sumergió la varilla de vidrio en alcohol y flameo con el mechero. Se extendió el inóculo de manera uniforme en la caja con ayuda de la varilla. Se volvió a flamear la varilla. En la Figura 40 se puede observar la esquematización de los pasos del método.

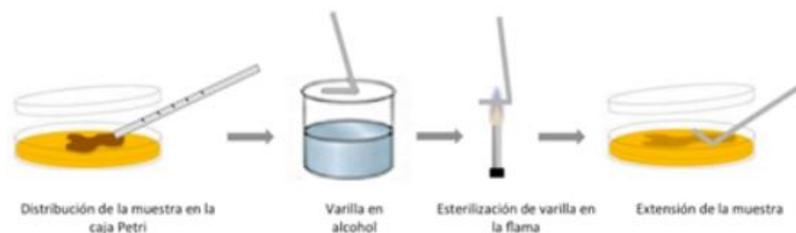


Figura 40. Sembrado de la dilución en la placa de agar nutritivo

Por último, se repitieron los pasos de inoculación para todas las diluciones hechas para cada muestra.



Se colocaron las cajas en la incubadora en posición invertida a 37°C durante 24 horas. Se colocó una caja de Petri adicional como control de las cajas Petri proporcionadas.

después del tiempo de incubación, se examinaron las cajas y se realizó el conteo total de las colonias presentes en aquellas diluciones que presenten entre 30 y 300 colonias.

Como se observa en la Figura 41 se preparó el inóculo que contiene la muestra de agua residual para ser vertido dentro de la caja Petri para iniciar con el cultivo de las bacterias e identificarlas.



Figura 41. Sembrado de disolución en caja Petri. A) Dilución a la 10^{-1} pasadas las 24 horas de incubación, donde se aprecia el crecimiento de distintas colonias bacterianas. B) Dilución a la a 10^{-2} con crecimiento de colonias bacterianas logrando identificar el crecimiento de 5 colonias del mismo tipo. C) Dilución a la 10^{-5} se obtiene un total de 146 colonias aparentemente de la misma especie.



Capítulo 7. Resultados

10.1 Operación del sistema de la celda de combustible microbiana

En las primeras pruebas de las celdas de combustible microbiana se trabajó en la búsqueda del mejor diseño para este prototipo, con la intención de tener una operación en condiciones de temperatura y presión ambientales, identificando los cambios físicos de ambos sistemas comparadas con las características iniciales del agua residual.

Puesta en marcha de la CCM 1

La CCM 1 se puso en marcha con un diseño tipo H que consta de dos cámaras una que corresponde al ánodo y la otra al cátodo, esta celda que se realizó con agua residual como sustrato teniendo un valor de DQO inicial de 1047 mg/l y desde su montaje presento un voltaje de 59 mV, al transcurrir el tiempo el crecimiento de voltaje fue aumentando paulatinamente hasta mantener un voltaje estable.

Tabla 6 se observa el monitoreo del voltaje obtenido durante las primeras dos horas de funcionamiento.

Tabla 6. Monitoreo de voltaje de la CCM 1 en sus primeras dos horas

TIEMPO (min.)	VOLTAJE (mV)
0	59
15	90
30	153
45	162.8
60	167.7
75	170.3
90	171.3
105	176.7
120	180

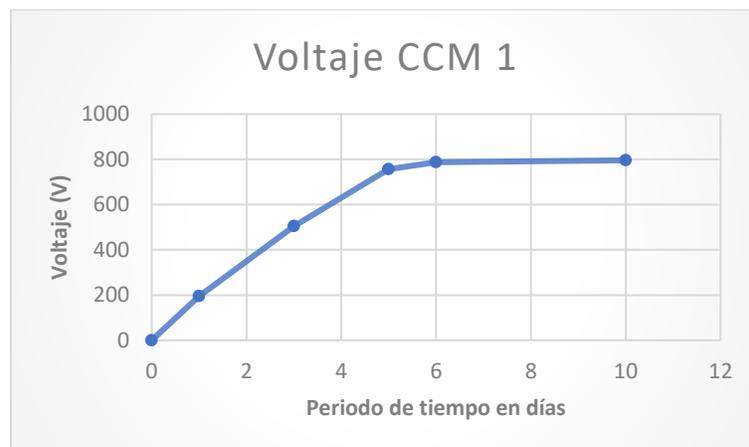


Al ser la primera celda, se desconocía si este crecimiento de voltaje era bueno o malo, pero a medida que el tiempo transcurría el voltaje aumentaba por este motivo se implementó una bitácora donde se anotaran los resultados de la generación de energía eléctrica.

Al paso de tres días se consiguió tener un voltaje de 505 mV, por lo que se deduce que las CCM tendrán un crecimiento de voltaje lento y que tardarán unos días para llegar su voltaje más alto.

En el quinto día se obtuvo un voltaje de 744 mV esto indica que las bacterias están formando su propio entorno y que están en crecimiento. Como observación en la cámara del ánodo se observa el comienzo de una sedimentación muy ligera y presenta un recubrimiento en los electrodos de grafito, lo que indicó que las bacterias se están agrupando, formando una red pili de distribución de voltaje. En la cámara del cátodo comienza a presentar un desvanecimiento en el tallo de las hojas de la planta elodea dando indicios de su próxima muerte esto es ocasionado por el exceso de carga orgánica que llega directa hacia la planta elodea por lo que se realizó un ajuste al diseño de las futuras celdas.

Al pasar los diez días se optó por tomar una muestra para realizar una prueba de DQO ya que el color del agua residual comenzó a tornarse de un color transparente y presento un voltaje de 796 mV siendo el valor más alto que se registró en esta CCM.



Gráfica 1. Crecimiento de voltaje de la CCM 1 en un lapso de 10 días



Para el análisis de la calidad del agua se tomó una muestra de agua de 10 ml la cual fue tomada con una pipeta y se colocó en un recipiente seco y esterilizado, se llevó a la planta de tratamiento de agua residual para realizar la prueba de DQO arrojando un valor de 126 mg/l. en contra de la DQO inicial que fue de 1047 mg/L.

Una vez obtenida la muestra de agua se cerró la celda y se ajustó a sus condiciones iniciales para que continuara generando energía eléctrica sin embargo, la celda presentó una disminución significativa de voltaje en los días siguientes hasta llegar a los 100 mV, esto fue provocado debido a la apertura de la cámara anódica ya que ocasionó la muerte de bacterias anaerobias, las cuales contribuían en la generación de energía eléctrica, este error producido en el diseño de la celda fue tomado en cuenta para la construcción de futuras CCM's y extraer muestras de agua sin afectar en su generación de energía eléctrica.

A pesar de su bajo voltaje la CCM continuo por 30 días más, presentando un voltaje de 110 ± 7 mV. Después de esto la celda se dio por terminada ya que se le realizo una prueba final de DBO y DQO₅.

Los resultados finales fueron los siguientes:

Para la prueba de DQO se obtuvo un valor de 120 mg/l y para la prueba de DBO₅ se obtuvo un valor de 1.7 mm/l.



Gráfica 2. Muestra los resultados finales del desempeño de la CCM 1

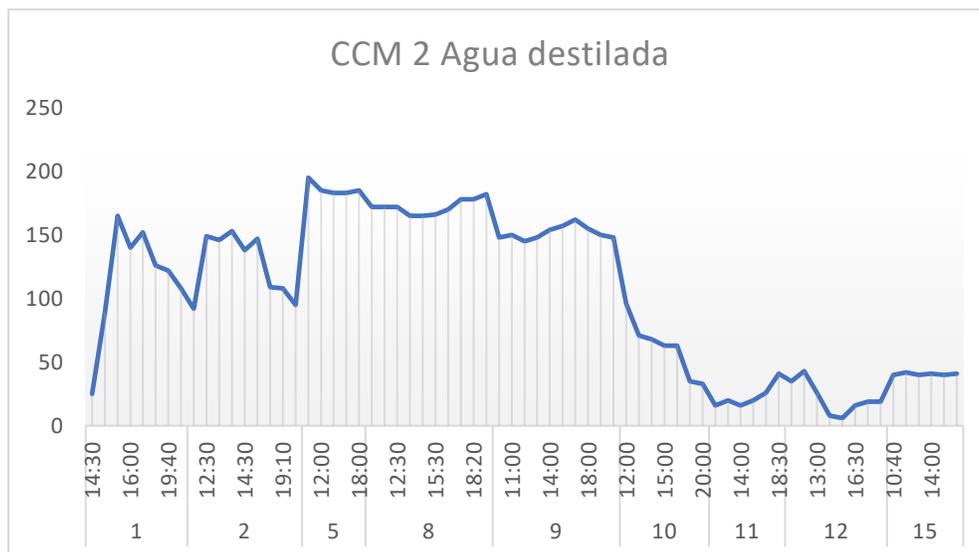


La gráfica 2 presenta el desempeño real de esta primera celda, su desempeño fue ascendente sin embargo por motivos experimentales decayó su voltaje no obstante si es posible mantener la generación de energía eléctrica dentro de una CCM teniendo un diseño apropiado.

Resultados obtenidos de la CCM 2

Como ya se mencionó en esta CCM presento un cambio en particular que fue la agregación de agua destilada en la cámara catódica, por lo que se quería conocer si esto fuese una mejora o una afectación en el desempeño de las CCM's.

Así mismo en el transcurso del monitoreo de voltaje se observó que en comparación con la CCM 1 el crecimiento de esta celda fue similar debido a que tuvo un crecimiento de voltaje en las primeras horas, sin embargo, el desempeño final fue muy inestable teniendo un promedio de voltaje entre los 150 mV y su duración en este voltaje fue de 9 días por lo que se descartó la posibilidad de utilizar agua destilada en vez de agua cruda para la cámara catódica, los resultados se observan en la Gráfica 3.



Gráfica 3. Voltajes obtenidos en la CCM 2 con agua destilada



Resultados de la CCM 3

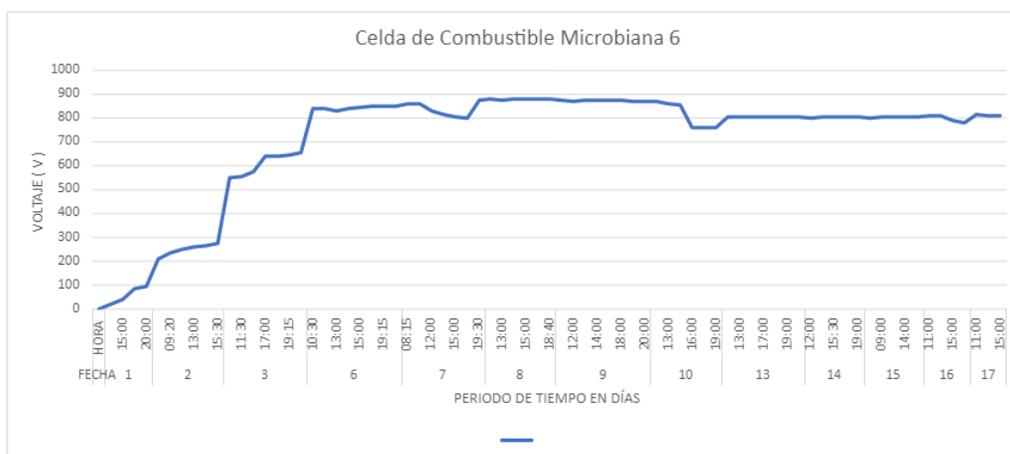
Esta celda se distingue por el uso de electrodos de aluminio para la trasmisión de voltaje dentro de la celda, sin embargo, los resultados fueron malos ya que el voltaje obtenido fue muy bajo, teniendo que descartar el uso de electrodos de aluminio para este tipo de CCM's debido a que el voltaje promedio fue de tan solo 57 mV en cinco días.

Resultados de la CCM 5

Esta celda se caracterizó por tener electrodos de acero inoxidable, en los primeros dos días alcanzo un voltaje de 505 mv, por lo que se consideraría para futuras celdas microbianas, pero en el trascurso de los días su rendimiento fue disminuyendo hasta llegar a tener un voltaje de 100 mv y teniendo un pH de 4.2 por lo que se descartó este material ya que al tener una solución acida dentro de la celda disminuyó la trasferencia de electrones fue bajando el rendimiento del voltaje.

Resultados de la CCM 6

La CCM 6 tuvo valores muy satisfactorios dentro de las CCM's, logrando alcanzar un voltaje de 844 mV en 6 días y manteniendo un voltaje promedio de 850 mV durante 17 días, una de las causas de la disminución de voltaje fue que presentó una fuga del lado de la cámara catódica, por lo que el volumen fue afectado significativamente, estas medidas se toman en cuenta para el diseño final de la celda a elaborar, se observan los resultados del comportamiento de esta CCM en la Gráfica 4.

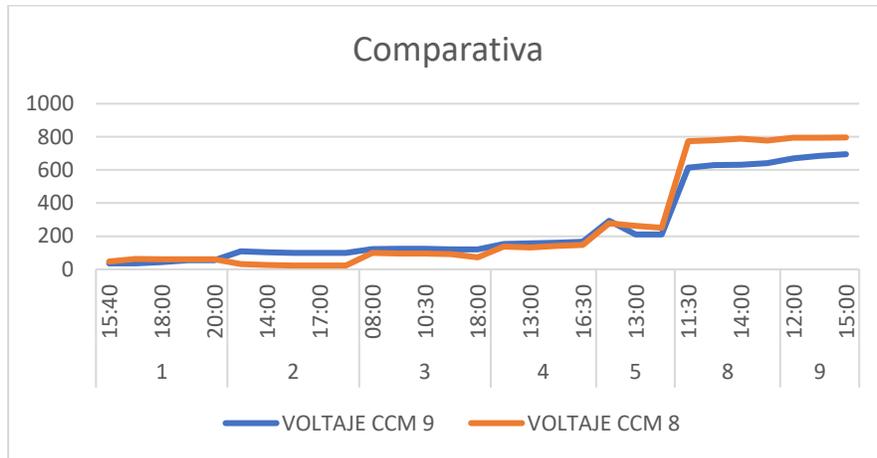


Gráfica 4. del desempeño registrado de la CCM 6



Comparativa entre la CCM 8 y CCM 9

Se realizó una comparativa de una celda que tuviera planta elodea y otra planta que tuviera microalga para analizar su comportamiento, para esto se realizaron dos CCM's con las mismas características físicas, en la CCM 8 será la celda microbiana que contara con microalga y la CCM 9 contará con 10 g de planta elodea, en la Gráfica 5 se observan los resultados de esta comparativa.



Gráfica 5. Se muestran los voltajes correspondientes a cada CCM

En el crecimiento de voltaje de ambas celdas fue muy similar, la CCM 9 presento en el segundo día un ligero voltaje superior a la CCM 8 no obstante después de llegar a los 8 días la CCM 8 tuvo un crecimiento de voltaje significativo, donde se encontró una diferencia de 150 mV, en la Figura 42 se observan las CCM en las mismas condiciones.

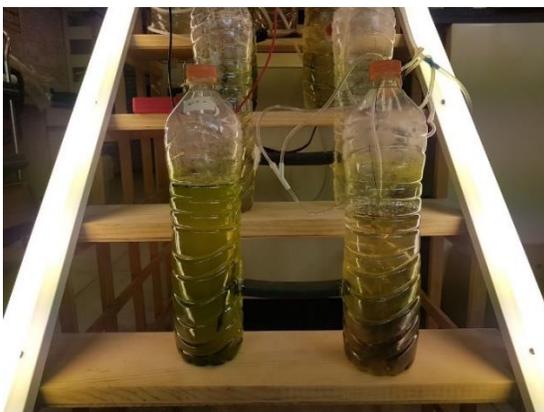


Figura 42. Montaje y análisis de CCM's



En la Tabla 7 se encuentra el concentrado de los datos más relevantes de cada CCM, logrando identificar que CCM obtuvo un mejor desempeño.

Tabla 7. Resultados de operación de las 9 celdas de combustible microbianas

CCM	Duración en días	Voltaje máx. en (mV)	Voltaje promedio en (mV)	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
CCM 1	38	796	189	1047	126	87.96
CCM 2	28	549	191	308	120	61.03
CCM 3	25	557	200.7	308	57	81.49
CCM 4	32	725	378.9	308	136	55.84
CCM 5	9	416	75	308	NA	NA
CCM 6	30	883	641.4	308	78A y 86C	74.67
CCM 7	30	870	366.4	308	60A Y 81C	73.7
CCM 8	18	890	569.3	147	21A Y 39C	85.71
CCM 9	16	695	266.6	147	24	83.67

La Tabla 7 generaliza los datos de voltajes producidos en conjunto con la durabilidad y remoción de carga orgánica, la carga orgánica es un factor muy importante dentro de la generación de energía ya que en esta se encuentran las bacterias que dan pie al funcionamiento de la celda, fue importante estar atento en el monitoreo de cada celda, así se logró determinar su comportamiento y tener un fácil análisis de cada una de estas.

**Cálculo de la eficiencia de remoción de DQO**

Donde:

η_{DQO} = Eficiencia de remoción de DQO en %.

DQO_i = Demanda química de oxígeno inicial en mg/L.

DQO_f = Demanda química de oxígeno final en mg/L.

Resultados del porcentaje de remoción de las CCM's

CCM 1

$$\eta_{DQO} = \frac{1047 \frac{mg}{l} - 126 \frac{mg}{l}}{1047 \frac{mg}{l}} (100) = 87.96 \%$$

CCM 2

$$\eta_{DQO} = \frac{308 \frac{mg}{l} - 120 \frac{mg}{l}}{308 \frac{mg}{l}} (100) = 61.03 \%$$

CCM 3

$$\eta_{DQO} = \frac{308 \frac{mg}{l} - 57 \frac{mg}{l}}{308 \frac{mg}{l}} (100) = 81.49 \%$$

CCM 4

$$\eta_{DQO} = \frac{308 \frac{mg}{l} - 136 \frac{mg}{l}}{308 \frac{mg}{l}} (100) = 55.84 \%$$

CCM 5 no aplica porque esta celda se descarto



CCM 6

$$\eta_{DQO} = \frac{308 \frac{mg}{l} - 78 \frac{mg}{l}}{308 \frac{mg}{l}} (100) = 74.67 \%$$

CCM 7

$$\eta_{DQO} = \frac{308 \frac{mg}{l} - 60 \frac{mg}{l}}{308 \frac{mg}{l}} (100) = 73.7 \%$$

CCM 8

$$\eta_{DQO} = \frac{147 \frac{mg}{l} - 21 \frac{mg}{l}}{147 \frac{mg}{l}} (100) = 85.71 \%$$

CCM 9

$$\eta_{DQO} = \frac{147 \frac{mg}{l} - 24 \frac{mg}{l}}{147 \frac{mg}{l}} (100) = 83.67 \%$$

DIFERENCIAL DE POTENCIA

Resultados del diferencial de potencia de cada CCM, tomando en cuenta la siguiente formula:

$$DP = \frac{(V_{Gen})^2}{R * A} = (\text{mW/m}^2)$$

CCM 1

$$DP = \frac{(0.796 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 340.65 \text{ mW/m}^2$$

CCM 2

$$DP = \frac{(0.549 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 162.04 \text{ mW/m}^2$$



CCM 3

$$DP = \frac{(0.557 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 166.8 \text{ mW/m}^2$$

CCM 4

$$DP = \frac{(0.725 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 282.59 \text{ mW/m}^2$$

CCM 5

$$DP = \frac{(0.416 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 93.04 \text{ mW/m}^2$$

CCM 6

$$DP = \frac{(0.883 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 419.18 \text{ mW/m}^2$$

CCM 7

$$DP = \frac{(0.870 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 406.93 \text{ mW/m}^2$$

CCM 8

$$DP = \frac{(0.890 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 425.86 \text{ mW/m}^2$$

CCM 9

$$DP = \frac{(0.695 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 259.69 \text{ mW/m}^2$$

Celdas destacadas de la primera fase

Las celdas con mejores resultados fueron la CCM 1, CCM 6 y CCM 8.

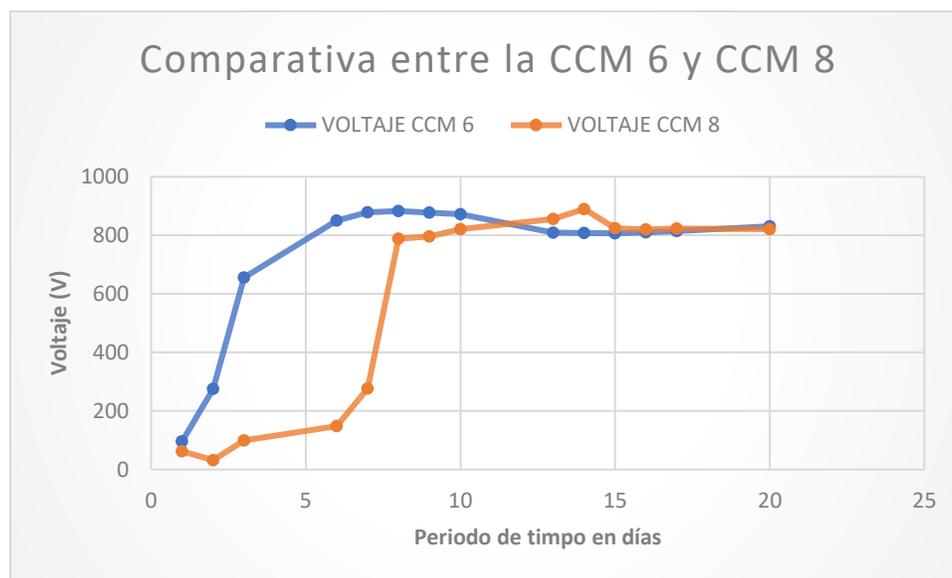
La CCM 1 destacó por el alto crecimiento de voltaje, en tan solo 2 horas se logró alcanzar un voltaje de 180 mV a comparación de las otras celdas que les tomo de uno a dos días, el factor de la carga orgánica fue la principal causa, ya que en esta celda fue la que presentó la caga orgánica más alta en comparación a las demás



CCMs, el voltaje en la celda fue constante por que indica que la cámara anódica debe estar en condiciones anaerobias para tener un funcionamiento estable y aprovechar la energía eléctrica generada dentro de las CCMs.

La CCM 6 destaco por su desempeño siendo la celda que se logró mantener por más días con un voltaje de 850 ± 25 mV. La CCM 8 presento un voltaje alto a pesar de tener una carga orgánica muy baja.

Tanto el diseño de la CCM 6 y la CCM 8 fueron considerados para realizar la celda final ya que en ellas se encontró un voltaje más estable y se lograron mantener en un voltaje promedio de 850 mV, en la Gráfica 6 se observa la comparación entre la CCM 6 y la CCM 8.



Gráfica 6. Comparativo del desempeño de la CCM 6 y CCM 8 en un periodo de 20 días

Análisis de Agua residual

Una de las partes esenciales para el funcionamiento de las CCM's es el uso de un sustrato, en el cual se utilizó agua residual, sin embargo, se desconocía que bacterias o microorganismos son los que ayudan a una CCM a generar energía eléctrica por tal motivo se realizó un pequeño estudio para investigar que microorganismos se encuentran presentes en la toma de agua residual y con esto mantener los microorganismos en buenas condiciones y estables.



Después de realizar el aislamiento de bacterias se destacaron los siguientes resultados:

De las colonias finales se aislaron y a cada una se realizó las pruebas de tinción de Gram, catalasa y oxidasa con la intención de identificar qué tipos de bacterias son las que se encuentran presentes en el agua residual.

Tabla 8. Resultados del análisis de agua residual

Tinción de Gram	Catalasa	Oxidasa	Pruebas	Aislado
Bacilos Gram positivos	Positiva	Negativa	-Agar MYP (Manitol Yema de huevo polimixina)	<i>Bacillus Cereus</i>
Bacilos Gram negativos	Negativa	Positiva	-Agar McConkey -Agar eosina azul de metileno	<i>Escherichia Coli</i>
Bacilos Gram negativos	Positivos	Positivos	-McConkey -Agar TCBS -Licuefacción de gelatina	<i>Aeromonas</i>
Cocos Gram positivos	Positivos	Negativos	-Agar sal y manitol - Coagulasa	<i>Staphylococcus aureus</i>

En la Tabla 8 se observan las pruebas que se realizaron a las diferentes colonias bacterianas para la identificación de la bacteria. 1– La primera colonia en identificar



fue la bacteria *Bacillus Cereus* dando positivo en la prueba de Tinción de Gram y Catalasa. 2 – Se identifica la Bacteria *Escherichia Coli* dando positivo en la prueba de Oxidasa. 3 - Se identifica la bacteria *Aeromonas* dando positivo en las pruebas de Catalasa y Oxidasa. 4- Se identifico la bacteria *Staphylococcus aureus* dando positivo en las pruebas de Tinción de Gram y Catalasa.

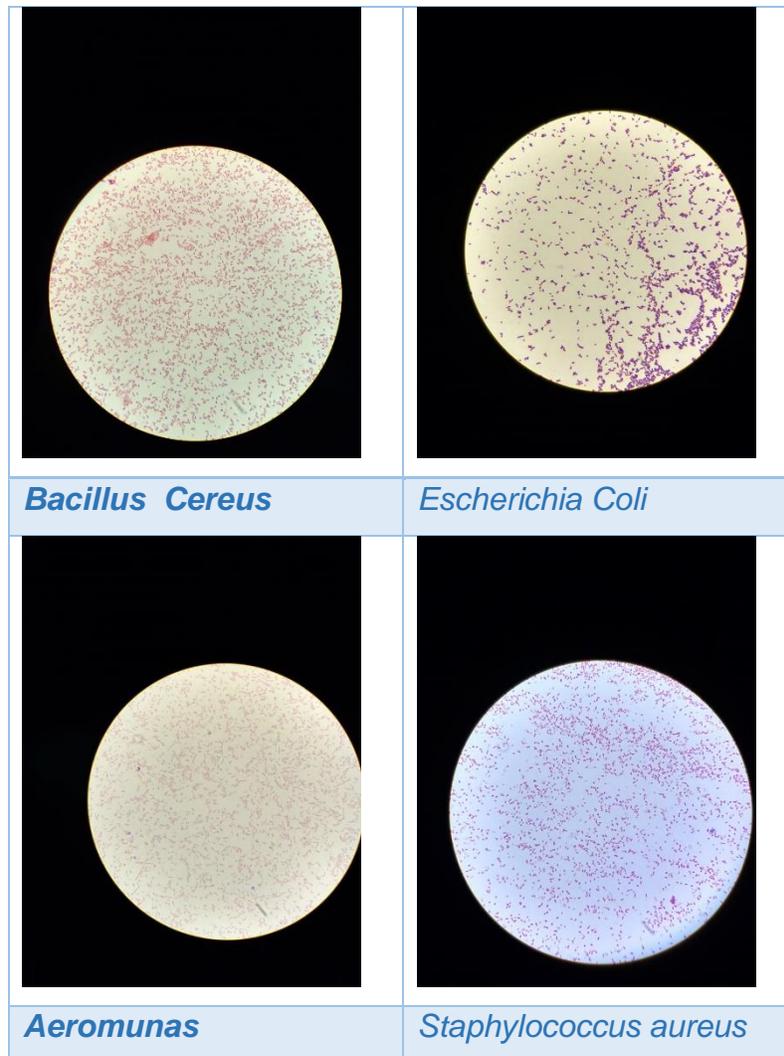


Figura 43. Imagen tomada desde el microscopio identificando la estructura bacteriana de cada tipo de bacteria



En la Figura 43 se encuentran las bacterias con mayor número de colonias y pertenecen a desechos orgánicos y enfermedades de los seres humanos, se pueden mantener en temperaturas de 5 a 55 °C por lo que no tendremos problemas con su temperatura de crecimiento.

Optimización de la CCM

Después de los resultados obtenidos en las primeras celdas se determinó en implementar la duplicación del mejor diseño para tener una mejor eficiencia de producción de energía y en la remoción de microorganismos.

Este diseño constaría de dos botellas con la capacidad de 1 litro, conectadas por medio de un puente de intercambio a una altura de 10 a 12 cm, con electrodos de grafito para ambas cámaras, la composición de los electrodos será de tres hilos de alambre de cobre con una barra de grafito en una extremidad del alambre, teniendo tres barras de grafito. La administración de oxígeno fue uno de los cambios que se realizaron, en el diseño de la CCM 6 y CCM 8 las celdas presentaron pequeñas fugas por parte de la manguera que se conecta directamente en la cámara catódica, esta se encuentra en la parte inferior de la botella por lo que se tenía que realizar una perforación para introducir la manguera con aire y a pesar que se colocó silicón alrededor de la botella al pasar los días se presentaba un pequeño goteo, siendo esto un factor más a la causa de fugas por esto se decidió cambiar el acceso de la manguera en la parte superior de la botella de esta forma se mantendría con un suministro de aire justo como en la CCM 1.

11.1 Segunda etapa

En esta etapa se construyeron cuatro nuevas celdas con el diseño mejorado, con la intención de colocar dos celdas con planta elodea y dos más con microalga spirulina, estas cuatro CCM's se monitorearon y analizaron para conocer el desempeño de estas especies.

Se prepararon las 4 CCM's con las mismas características de construcción y los mismos materiales para cada una de las celdas.



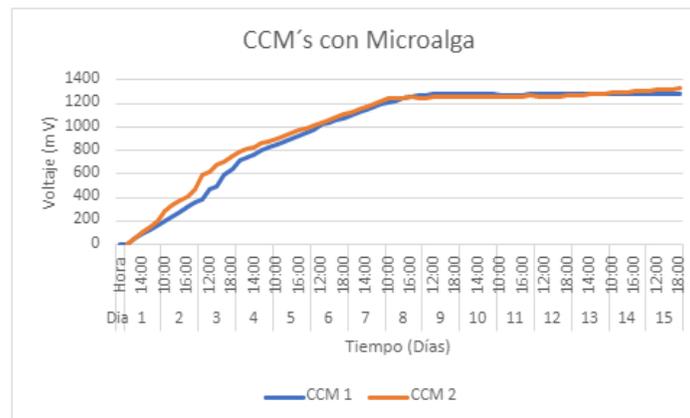
Tabla 9. Características de construcción para la CCM de la segunda etapa

Cámaras de la CCM's	Material de PET con capacidad de 1 L
Electrodos	3 barras de grafito con un peso total de 4 gramos y 3 hilos de cobre
Ánodo	Agua residual DQO 512
Cátodo	Microalga espirulina 1 litro Elodea Canadensis 15 gramos
Puente de intercambio iónico	Material de PET y se añadió un tapón de algodón que funcionara como membrana
Oxigenación	Bomba de oxígeno para 19 litros

Se puso en marcha la instalación de las 4 celdas de combustible microbianas para determinar que especie es la que brinda un mejor desempeño y aprovechar la mayor cantidad de energía eléctrica generada.

Resultados obtenidos de las 4 CCM's en donde se dividieron 2 CCM's con la especie microalga y 2 CCM's con elodea:

En la Grafica 7 se muestran los resultados de las dos CCM's que albergan la especie microalga:



Gráfica 7. Comparativo de la generación de voltaje y comportamiento de las dos CCM's que contienen microalga



Las celdas que contienen microalgas tuvieron una adaptación favorable dentro del nuevo diseño de la CCM.

Diferencial de potencia de cada CCM:

CCM 1

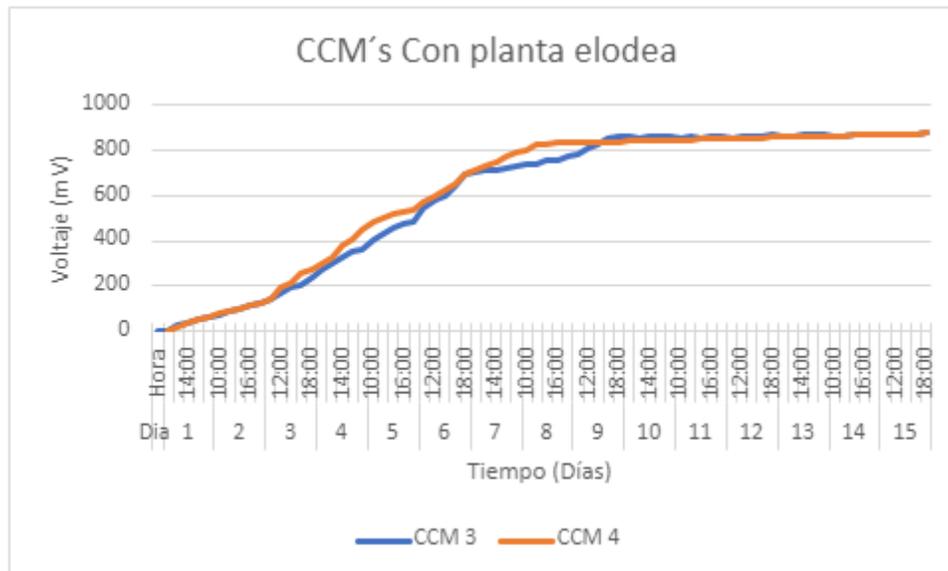
$$DP = \frac{(1280 \text{ mV})^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = 0.880 \text{ W/m}^2$$

CCM 2

$$DP = \frac{(1283 \text{ mV})^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = 0.884 \text{ W/m}^2$$

Al mismo tiempo se montaron otras dos CCM's con la especie elodea, en las que se monitoreo su generación de voltaje para tener un análisis entre las dos especies y determinar cuál es la que presentó una mejor adaptabilidad.

En la Gráfica 8 se muestra el monitoreo de las CCM's con planta elodea, las cuales fueron monitoreadas con un lapso de 15 días.



Gráfica 8. Comparativo de la generación de voltaje y comportamiento de las dos CCM's que contienen elodea



CCM 3

$$DP = \frac{(870 \text{ mV})^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = 0.406 \text{ W/m}^2$$

CCM 4

$$DP = \frac{(875 \text{ mV})^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = 0.411 \text{ W/m}^2$$

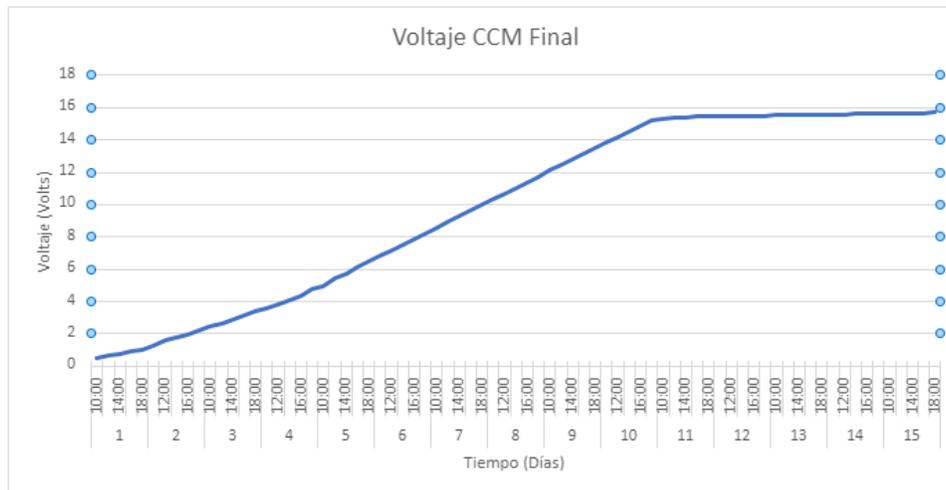
La generación de voltaje en las CCM's con microalga alcanzó un voltaje de 800 mv en tan solo 4 días, es decir un 40 % más rápido que las CCM's con planta elodea esto quiere decir que la adaptación de la microalga es mejor y favoreció en el desempeño de la generación eléctrica.

Una de las ventajas de utilizar microalga dentro de este sistema es su adaptación y crecimiento, ya que favorece en producción de su cosecha y ser utilizada como biocombustible empleando un proceso adicional de refinación. Por tal motivo se considera a la microalga como la especie ganadora en esta comparativa.

12.1 Tercera etapa

Puesto que se determinó que la microalga es una especie que se logra adaptar con mayor facilidad en este tipo de sistemas se propuso hacer una tercera etapa. Donde se construyeron 15 CCM's con las mismas características de construcción y la misma cantidad de microalga y carga orgánica, para realizar una última fase donde se conectaron las celdas en serie y almacenar la energía eléctrica generada en una batería.

En la Gráfica 9 se muestra el desarrollo del voltaje generado de la suma de las 15 CCM's.



Gráfica 9. Representación gráfica de la generación de voltaje de las 15 CCM's conectadas en serie

Se tomaron las lecturas de voltaje por un periodo de 15 días en los cuales se logró obtener un voltaje máximo de 15.7 Volts.

Logrando almacenar dicha energía se aprovechó para utilizarla y alimentar diferentes dispositivos que consuman bajos niveles de voltaje, no mayor a los 12 volts.

Sin embargo, para complementar este proyecto se realizó un inversor de voltaje que nos permite transformar este voltaje de 12 V a 127 V logrando energizar dispositivos de mayor capacidad. Otra opción sería colocar un inversor y alimentar dispositivo de 127 V.

Porcentaje de remoción

CCM 1

$$\eta_{DQO} = \frac{2690 \frac{mg}{l} - 378 \frac{mg}{l}}{2690 \frac{mg}{l}} (100) = 85.94 \%$$

Diferencial de potencia de la CCM:

$$DP = \frac{(V_{Gen})^2}{R * A} = (mW/m^2)$$



CCM Final

$$DP = \frac{(15.7 V)^2}{(1000 \Omega)(1.86 \times 10^{-3} m^2)} = 132.52 W/m^2$$

Eficiencia coulombica

$$EC\% = \frac{U_i t_i}{RFb\Delta SV} M * 100$$

Donde:

U_i = Es el voltaje de la CCM.

t_i = Tiempo de la CCM.

R = Es la resistencia externa.

F = Es la constante de Faraday ($F = 26,801 A \cdot h / mol$).

$b = 4$ es el número de moles de electrones producidos por un mol de demanda química de oxígeno (DQO).

ΔS = Es la concentración removida de DQO (g/L).

V = Es el volumen del líquido (L).

M = Es el peso molecular del dióxígeno (32g/mol).

$$EC\% = \frac{(15.7 V)(360 h)}{\left(\frac{1000 V}{A}\right)\left(\frac{26.801 Ah}{mol}\right)(4)\left(\frac{2.312 g}{l}\right)2l} 32 g/mol * 100 = 84.35 \%$$

Con ayuda de la ecuación de la Eficiencia Coulombica se obtuvo el valor de 84.35%, teniendo en cuenta la energía eléctrica obtenida en la experimentación.



13. Conclusiones

Se evaluó el efecto de plantas acuáticas, en celdas de combustible microbiana (CCM) para la generación de energía eléctrica, mediante el diseño, implementación y evaluación en celdas de combustible microbiana.

Se generó energía eléctrica a partir de la celda de combustible microbiana (CCM), además de contribuir a la disminución del valor de DQO en el agua residual dentro de la celda, siendo una excelente alternativa para el tratamiento de aguas y una alternativa para la obtención de energía eléctrica sin contaminantes.

Se diseñó una celda de combustible microbiana (CCM) a partir de materiales reciclados, se utilizaron botellas de plástico PET como compartimentos de la cámara anódica y catódica, el puente de intercambio fue de un material plástico y barras de grafito como electrodos sujetos por un alambre de cobre.

En la etapa 1 y la etapa 2 experimental se determinaron los componentes apropiados para realizar la CCM final, así como la evaluación de la generación de energía eléctrica.

La CCM Final que consta de 15 CCM's conectadas en serie para tener la suma de todo el voltaje generado por las celdas, se utilizó el sustrato de agua residual con un valor de DQO de 1570 mg/L y en la cámara del cátodo se emplearon microalgas, después de 2 semanas se obtuvo un voltaje final de 15.7 V.

Tras mantener el voltaje estable se conectó una batería para almacenar el voltaje generado y así ser utilizado en otros dispositivos que tengan una alimentación de 12 V. Con la ayuda de un inversor de voltaje se logró elevar el voltaje de 12 V a 127 V alimentando dispositivos con este voltaje.

La CCM Final obtuvo una respuesta favorable como generadora de energía y como remediadora de aguas residuales, con la capacidad de generar energía eléctrica de forma biológica a partir de las algas y el agua residual.



La eficiencia coulombica obtenida por medio de una celda de combustible microbiana nos ayuda a determinar el desempeño eléctrico que genera.

En comparación con otras investigaciones la CCM Final obtuvo una eficiencia coulombica de 84.35% con agua residual como sustrato, distintas investigaciones con sustrato diferente presentaron resultados similares o muy bajos, por ejemplo CCM's con sustrato de acetato obtuvieron eficiencias entre 63 – 78 % , utilizando proteínas como sustrato su eficiencia fue de 6%, empleando lactato y ferrocianuro de potasio como sustrato la eficiencia coulombica fue de 2.4%, por último la CCM que empleo glucosa como sustrato obtuvo un valor de eficiencia del 89%. Con esto se determina que los valores de eficiencia coulombica para esta investigación empleando agua residual como sustrato obtienen un desempeño eléctrico favorable.



Agradecimiento

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor la ingeniera Leydi Rubí Pérez y a mi co-asesor Ricardo Delgadillo, quien con sus conocimientos y apoyo me guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la Facultad de Estudios Superiores Acatlán, en especial al Departamento de Tecnología Ambiental por las facilidades otorgadas para llevar a cabo este proyecto y a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la FESA, por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

También se hace la mención de agradecimiento del IPN - Escuela Nacional de Ciencias biológicas en el departamento de microbiología, donde se realizaron análisis de microorganismos, con ayuda de Cristina Yuriko Contreras Blancas quien fue mi instructora para realizar las pruebas de identificación de bacterias y el análisis de aislamiento de bacterias.

Tanto a mi Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán como a mis profesores le quiero hacer una mención honorífica por compartirme de sus conocimientos y el uso de las instalaciones en las cuales me forjaron las bases de mi licenciatura.

Por último y no menos importante, quiero agradecer a toda mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero mencionar a mis padres, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías, siempre entregaron todo por verme triunfar y por culminar mi licenciatura.

A mi hermana Mónica Jacquelin quien siempre me apoyo en todo momento y nunca perdió la fe en que podría terminar mis estudios, con quien compartí mis sueños y anhelos.

Y a mi novia Mariana quien estuvo al tanto de mis avances y logros, motivándome a concluir mi tesis, enseñándome que nunca te debes de rendir.



Referencias

1. Alzate-Gaviria, Liliana; Fuentes-Albarrán, Carmen; Álvarez-Gallegos, Alberto; Sebastian, P. J. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem Interciencia. Asociación Interciencia Información, 33 (7), 503-509.
2. Arias Peñaranda, M.; Martínez Roldán A.; Cañizares Villanueva R., (2013). Producción de biodisel a partir de microalgas: Parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., Ciudad de México, México.
3. Borole, Abhijeet & Yieng Hamilton, Choo & Vishnivetskaya, Tatiana & Leak, David & Andras, Calin. (2009). Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems. Biochemical Engineering Journal - (48). 71-80.
4. Catalogo español de especies exóticas invasoras (2013) ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-especies/elodea_canadensis_2013_tcm30-69828.pdf
5. Chang, Raymond, Goldsby, Ken. (2013). Fisicoquímica. 4ta Ed. McGraw-Hill Interamericana.
6. Conagua, Semarnat. (2014) Estadísticas del Agua en México.
7. Das D. (2018). Microbial Fuel Cell A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts. Kharagpur, India: Springer International.
8. Du Zhuwei, Li Haoran, Gu Tingyue (2007). A state-of-the-art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. Biotechnology Advances.;25(5):464-82.
9. Espigares García, M. y Pérez López, JA (1985). Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada Servicios de Publicaciones. Granada.
10. Farrera, L. G. (2014). Introducción a la electroquímica. Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Química, UNAM.



11. González Céspedes Alicia Ma. (2016). Cultivo de microalgas a gran escala: Sistemas de producción, Grupo cooperativo Cajamar. Recuperado septiembre 2019 de: <https://www.cajamar.es/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/formacion/actividades-de-transferencia/018-microalgas2-1467367279.pdf>
12. Gregory KB, Bond DR, Lovley DR. (2004). Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environmental Microbiology*; 6(6):596-604.
13. Heitner-Wirguin, C. (1996). "Avances recientes en membranas de ionómeros perfluorados: estructura, propiedades y aplicaciones". *Revista de ciencia de la membrana*. 120: 1–33.
14. Helder Marjolein. (2012), Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell: Electricity generation with living plants – from lab to application, PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
15. Huang H, et al. (2011) Identificación de inhibidores cruciales de levadura en bioetanol y mejora de la fermentación a pH alto y sólidos totales altos. *Bioresour Technol*. 102 (16): 7486-7493.
16. Jijaba Cáceres Sandro Juniors. (2018). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas a partir de tiosulfato utilizando cepas de *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Tesis de maestría en microbiología. Universidad Peruana Cayetano Heredia. Recuperado de: http://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/upch/3965/Produccion_JibajaCaceres_Sandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
17. Korneel Rabaey, Jorge Rodríguez, Linda L. Blackall, Jurg Keller, Pamela Gross, Damien Batstone, Willy Verstraete y Kenneth H Neelson (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities. Revisión de Winogradsky. *The ISME Journal*. 1, 9-18.
18. Lee, Y. K.; Ding, S. Y.; Low, C. S.; Chang, Y. C.; Forday, W. L.; Chew, P. C., (1995). Design and performance of an alpha -type tubular photobioreactor for mass cultivation of microalgae. *Journal of Applied Phycology* 7, 1.
19. Logan B.E. y Regan J. M., (2006). Microbial fuel cells: Challenges and applications. *Environmental Science Technology*. 40: 5172-5180.



20. Lovley DR, Gregory KB, Bond DR. (2004). Electrodo de grafito como donador de electrones para la respiración anaeróbica. *Environmental Microbiology*. 6 (6): 596-604.
21. Rabaey K.; Lissens G.; Siciliano S. D.; Verstraete W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology letters*, 25(18), 1531-1535.
22. Rabaey K.; Lissens G.; Siciliano S. D.; Verstraete W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology letters*, 25(18), 1531-1535.
23. Ramírez Regalado Víctor Manuel (2016). *Temas selectos de Química 2*. Grupo editorial patria.
24. Revelo, Dolly M, Hurtado, Nelson H, & Ruiz, Jaime O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28.
25. Revelo, Dolly M, Hurtado, Nelson H, Ruiz, Jaime O, & López, Stefanía. (2015). Using Native Microorganisms for the Simultaneous Removal of Organic Matter and Cr (VI) in a Biocathode Microbial Fuel Cell (MFC). *Información tecnológica*, 26(6), 77-88.
26. Romero Mejía Alba Ayde, Vásquez, Armando Jorge Adrián, Lugo González A.; (2012) Bacterias, fuente de energía para el futuro; *Tecnura* 16 (32); 118 – 143.
27. SANZ ELORZA M., DANA SÁNCHEZ E.D. & SOBRINO VESPERINAS E., eds. 2004. *Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España*. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, 384 pp.
28. Skoog, Douglas A.; Leary, James J. (2008). *Principios de Análisis Instrumental*. 5ta Ed., Madrid: McGRAW-HILL.
29. Skoog, Douglas A.; West, Donald M. y Holler, F. James (2014). *Química Analítica* 9na Ed. México: McGRAW-HILL.
30. Tibaquirá Juan E., Jonathan D. Posner. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica*. Universidad Tecnológica de Pereira. 15(42).



Apéndices

Apéndice I

Este proyecto fue validado y participo en el sexto congreso de ciencia, educación y tecnología de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

Donde se presento una celda de combustible microbiana tipo H empleando agua residual como sustrato en la cámara del ánodo y la implementación de plantas acuáticas en la cámara del cátodo.

Apéndice II

El proyecto se desarrolló en el centro de investigación de la FES Acatlán, las condiciones físicas en las que se llevó a cabo son las siguientes:

Altitud de 2300 metros sobre el nivel del mar.

Temperatura media anual de 15 °C, con máxima de 32 °C y mínima de 3 °C.

La temperatura promedio del laboratorio ronda entre 15 a 25 °C.

Teniendo en cuenta estos factores los resultados obtenidos se muestran en las tablas de monitoreo de cada CCM que se empleó.



CCM 1

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	13:00	59
	13:15	90
	13:30	153
	13:45	162.8
	14:00	167.7
	14:15	170.3
	14:30	171.3
	14:45	176.7
	15:00	195
3	12:00	505
	13:00	503
5	17:00	749
	20:00	757
6	13:53	788
	16:00	783
	19:10	780
	20:00	786
10	11:40	796
	15:30	680
	16:00	640
	16:30	651
	17:40	655
	19:40	626
	20:10	630
11	12:00	353
	12:30	364
	13:00	340
	14:00	335
	14:30	333
	15:00	333
	18:00	349
	19:10	340
	20:00	335
14	10:00	219
	12:00	213
	14:00	213
	17:00	219
	18:00	219
17	10:30	104
	12:10	103

	01:30	103
	02:30	103
	03:30	107
	04:00	109
	17:00	111
	18:20	115
	20:00	116.9
18	10:30	109
	11:00	109
	12:00	110
	13:00	110
	14:00	113
	15:00	110
	16:00	116
	18:00	119
	19:20	123
	20:00	121
19	12:00	102
	13:00	103
	14:00	107
	15:00	108
	17:00	110
	19:00	112
	20:00	117
20	12:00	103
	13:00	105
	14:00	108
	15:00	107
	16:30	108
21	18:30	113
	11:00	101
	12:00	103
	13:00	107
	14:00	108
	15:00	109
	16:30	109
24	18:00	109
	20:00	113
	10:40	117
	12:00	116
	13:00	118
	14:00	120



	16:30	124	
	19:40	119	
25	16:00	118	
	18:00	123	
	20:00	124	
26	12:00	115	
	13:00	112	
	14:00	110	
	15:00	113	
	17:00	113	
	20:00	113	
27	08:00	116	
	09:20	120	
	11:30	118	
	13:00	118	
	14:00	116	
	15:30	118	
28	10:50	121	
	11:30	121	
	15:30	121	
	17:00	120	
	18:00	115	
	19:15	116	
	20:00	116	
31	10:30	118	
	12:00	113	
	14:00	106	
	15:00	108	
	18:30	118	
	19:15	119	
	20:00	118	
32	08:15	119	
	10:00	119	

	12:00	110
	14:00	109
	15:00	109
	16:50	117
	19:30	117
33	11:30	111
	13:00	108
	14:00	103
	15:00	104
	16:30	113
	18:40	116
34	10:30	120
	12:00	111
	13:00	110
	14:00	107
	15:00	106
	18:00	117
	19:00	105
	20:00	106
35	12:00	112
	13:00	111
	14:00	110
	16:00	103
	17:30	110
	19:00	112
38	12:00	105
	13:00	103
	15:40	35
	17:00	56
	18:00	63
	19:00	63
	20:00	63



CCM agua destilada

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	14:30	25
	15:00	89
	15:30	165
	16:00	140
	16:30	152
	17:40	126
	19:40	122
	20:10	108
2	12:00	92
	12:30	149
	13:00	146
	14:00	153
	14:30	138
	15:00	147
	18:00	109
	19:10	108
20:00	95	
5	10:00	195
	12:00	185
	14:00	183
	15:30	183
	18:00	185
8	10:30	172
	12:10	172
	12:30	172
	13:30	165
	14:30	165
	15:30	166
	16:00	170
	17:00	178
	18:20	178
20:10	182	
9	10:30	148
	11:00	150

	12:00	145
	13:00	148
	14:00	154
	15:00	157
	16:00	162
	18:00	155
	19:20	150
	20:00	148
10	12:00	96
	13:00	71
	14:00	68
	15:00	63
	17:00	63
	19:00	35
	20:00	33
	12:00	16
	13:00	20
	14:00	16
	15:00	20
	16:30	26
	18:30	41
	11:00	35
	12:00	43
	13:00	26
	14:00	8
	15:00	6
	16:30	16
	18:00	19
12	20:00	19
	10:40	40
	12:00	42
	13:00	40
	14:00	41
	16:30	40
	19:40	41
15		



CCM 2

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	16:00	134
	18:00	162
	20:00	171
2	12:00	220
	13:00	224
	14:00	228
	15:00	227
	17:00	229
	20:00	233
3	08:00	392
	09:20	394
	11:30	402
	13:00	406
	14:00	413
	15:30	422
4	10:50	542
	11:30	549
	15:30	525
	17:00	525
	18:00	526
	19:15	524
	20:00	518
7	10:30	510
	12:00	500
	13:00	482
	14:00	475
	15:00	467
	18:30	284
	19:15	227
	20:00	226
8	08:15	251
	10:00	280
	12:00	280

	14:00	285
	15:00	280
	16:50	231
	19:30	264
9	11:30	255
	13:00	259
	14:00	266
	15:00	272
	16:30	223
	18:40	236
10	10:30	260
	12:00	262
	13:00	266
	14:00	273
	15:00	270
	18:00	242
	19:00	239
	20:00	237
11	12:00	222
	13:00	220
	14:00	219
	16:00	196
	17:30	206
	19:00	224
	14	12:00
13:00		55
15:40		58
17:00		58
18:00		59
19:00		58
20:00		59
15		12:00
	14:00	57
	15:30	56
	17:00	62

16	19:00	62
	08:00	64
	09:00	63
	10:30	57
	14:00	56
17	18:00	58
	11:00	65
	15:00	61
18	16:30	58
	11:00	60
	13:00	58
21	15:00	58
	11:30	18
	13:00	16
22	14:00	12
	15:00	10
	12:00	28
	14:00	34
23	15:00	34
	11:00	29
	13:00	49
	14:00	45
	15:00	40
	17:00	39
	19:30	35
24	11:00	17
	19:30	20
25	08:00	10
	11:00	6
	12:00	6
	13:00	5
	14:00	5
28	17:00	5
	10:40	4
	12:15	4



CCM con electrodos de aluminio

CCM		
Día	Hora	Voltaje (mV)
1	16:00	40
	18:00	35
	20:00	57
2	12:00	15
	13:00	10
	14:00	15
	15:00	7
	17:00	9
	20:00	8
3	08:00	9
	09:20	26
	11:30	30
	13:00	10
	14:00	33
	15:30	33
4	10:50	15
	11:30	13
	15:30	10
	17:00	7
	18:00	10
	19:15	8
	20:00	7



CCM 3

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	10:50	204
	11:30	208
	15:30	224
	17:00	230
	18:00	240
	19:15	242
	20:00	241
	2	10:30
12:00		471
13:00		470
14:00		470
15:00		474
18:30		509
19:15		509
3	20:00	511
	08:15	557
	10:00	523
	12:00	528
	14:00	523
	15:00	550
4	16:50	552
	19:30	554
	11:30	463
	13:00	458
	14:00	450
	15:00	458
	16:30	431
	18:40	457
5	10:30	260

	12:00	262
	13:00	253
	14:00	246
	15:00	242
	18:00	203
8	19:00	203
	20:00	205
	12:00	197
	13:00	197
	14:00	196
	16:00	163
	17:30	168
9	19:00	171
	12:00	110
	13:00	110
	15:40	104
	17:00	102
10	18:00	100
	19:00	94
	20:00	94
	12:00	74
11	14:00	73
	15:30	73
	17:00	67
12	19:00	67
	08:00	71
	09:00	72
15	10:30	72
	14:00	71
	18:00	68
	11:00	71

16	13:00	70
	15:00	68
	16:30	65
17	11:00	66
	13:00	63
	15:00	63
	11:30	55
	13:00	54
	14:00	53
18	15:00	52
	12:00	47
	14:00	45
19	15:00	45
	11:00	42
	13:00	41
	14:00	40
	15:00	39
	17:00	40
22	19:30	40
23	11:00	40
	19:30	40
24	08:00	40
	11:00	40
	12:00	40
	13:00	40
	14:00	39
25	17:00	38
	10:40	51
	12:15	50



CCM 4

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	16:00	35
	18:00	24
	20:00	35
2	12:00	82
	13:00	90
	14:00	90
	15:00	98
	17:00	98
3	20:00	119
	08:00	254
	09:20	176
	11:30	183
	13:00	260
	14:00	191
4	15:30	203
	10:50	367
	11:30	292
	15:30	300
	17:00	363
	18:00	374
	19:15	409
20:00	408	
7	10:30	691
	12:00	619
	13:00	653
	14:00	649
	15:00	672
	18:30	655
	19:15	725
	20:00	720
8	08:15	482
	10:00	510
	12:00	519
	14:00	525
	15:00	650
	16:50	640
	19:30	597
9	11:30	516
	13:00	368
	14:00	392
	15:00	397
	16:30	406

10	18:40	409
	10:30	505
	12:00	530
	13:00	540
	14:00	520
	15:00	528
	18:00	562
	19:00	538
	20:00	526
11	12:00	543
	13:00	544
	14:00	535
	16:00	545
	17:30	556
14	19:00	617
	12:00	470
	13:00	440
	15:40	453
	17:00	454
	18:00	454
15	19:00	451
	20:00	453
	12:00	480
	14:00	475
16	15:30	400
	17:00	456
	19:00	458
	08:00	463
17	09:00	438
	10:30	425
	14:00	457
	18:00	468
18	11:00	489
	13:00	478
	15:00	487
21	16:30	469
	11:00	412
	13:00	406
22	15:00	424
	11:30	326
	13:00	276
	14:00	288
15:00	275	

23	12:00	335
	14:00	288
	15:00	210
	16:00	258
24	17:40	266
	18:50	288
	19:30	309
	20:00	314
25	11:00	333
	13:00	254
	14:00	285
	15:00	150
	17:00	180
28	19:30	180
	11:00	207
	19:30	249
	08:00	260
29	11:00	365
	12:00	355
	13:00	353
	14:00	326
	17:00	346
	10:40	494
30	12:15	423
	15:00	366
	16:00	380
	17:00	380
	19:45	409
31	11:00	359
	12:40	320
	14:00	330
	15:00	353
32	17:00	350
	18:30	344
	10:30	254
	11:30	258
	13:00	243
31	15:00	243
	16:00	211
	17:00	211
	19:30	211
32	11:00	194
	12:00	200



CCM 5 Electrodo de acero inoxidable

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	16:00	165
	18:00	165
	20:00	146
2	12:00	390
	13:00	396
	14:00	400
	15:00	410
	17:00	410
	20:00	416
3	08:00	303
	09:20	367
	11:30	297
	13:00	322
	14:00	320
4	10:50	184
	11:30	192
	15:30	160
	17:00	160
	18:00	118
	19:15	127
	20:00	130
7	10:30	24
	12:00	20
	13:00	70
	14:00	65
	15:00	55
	18:30	76
	19:15	70
	20:00	73
8	08:15	63
	10:00	65
	12:00	65
	14:00	68
	15:00	62
	16:50	64
	19:30	65
9	11:30	17

	13:00	20	
	14:00	28	
	15:00	10	
	16:30	32	
	18:40	4	
	10:30	1	
	12:00	0	
	13:00	4	
10	14:00	0	
	15:00	0	
	18:00	0	
	19:00	0	
	20:00	0	
	11	12:00	113
		13:00	115
14:00		112	
16:00		112	
14	12:00	154	
	13:00	152	
	15:40	151	
15	12:00	171	
	14:00	169	
	15:30	175	
	17:00	108	
	19:00	109	
16	08:00	59	
	09:00	67	
	10:30	67	
	18:00	37	
17	13:00	45	
	15:00	47	
	16:30	27	
18	11:00	38	
	13:00	29	
	15:00	29	
21	11:30	0	
	13:00	0	
	14:00	0	
	15:00	0	



CCM 6

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	14:00	18
	15:00	38
	17:00	88
	20:00	96
2	08:00	213
	09:20	237
	11:30	253
	13:00	260
	14:00	267
	15:30	275
3	10:50	551
	11:30	554
	15:30	576
	17:00	644
	18:00	644
	19:15	649
20:00	656	
6	10:30	844
	12:00	841
	13:00	834
	14:00	844
	15:00	846
	18:30	850
	19:15	850
	20:00	850
7	08:15	861
	10:00	861
	12:00	832
	14:00	819
	15:00	809
	16:50	804
	19:30	879
	19:30	879
8	11:30	880
	13:00	879
	14:00	882
	15:00	880
	16:30	880
	18:40	883

9	10:30	877
	12:00	874
	13:00	875
	14:00	875
	15:00	878
	18:00	875
	19:00	874
20:00	873	
10	12:00	872
	13:00	860
	14:00	858
	16:00	762
	17:30	763
	19:00	763
	19:00	763
13	12:00	808
	13:00	807
	15:40	807
	17:00	805
	18:00	805
	19:00	808
	20:00	809
14	12:00	804
	14:00	805
	15:30	805
	17:00	808
	19:00	808
	19:00	808
	19:00	808
15	08:00	804
	09:00	807
	10:30	807
	14:00	805
	18:00	807
16	11:00	810
	13:00	810
	15:00	791
	16:30	782
	16:30	782
17	11:00	815
	13:00	813
	15:00	813
20	11:30	829
	13:00	831

21	14:00	831
	15:00	830
	12:00	837
22	14:00	839
	15:00	838
	11:00	838
	13:00	837
23	14:00	838
	15:00	835
	17:00	833
	19:30	830
	19:30	830
24	11:00	820
	19:30	820
	08:00	593
	11:00	500
	12:00	433
	13:00	385
	14:00	352
27	17:00	353
	10:40	319
	12:15	286
	15:00	288
	16:00	288
	17:00	293
	19:45	292
28	11:00	287
	12:40	291
	14:00	272
	15:00	265
	17:00	239
	18:30	223
29	10:30	224
	11:30	224
	13:00	227
	15:00	231
	16:00	231
30	17:00	231
	19:30	240
	11:00	243
	12:00	240



CCM 7

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	14:00	54
	15:00	45
	17:00	76
	20:00	100
2	08:00	182
	09:20	196
	11:30	205
	13:00	215
	14:00	220
3	10:50	423
	11:30	443
	15:30	457
	17:00	480
	18:00	509
	19:15	516
6	20:00	529
	10:30	823
	12:00	812
	13:00	816
	14:00	813
	15:00	807
	18:30	809
	19:15	808
7	20:00	809
	08:15	815
	10:00	856
	12:00	866
	14:00	866
	15:00	870
	16:50	870
8	19:30	797
	11:30	805
	13:00	796
	14:00	785
	15:00	772
	16:30	679
18:40	672	

9	10:30	660
	12:00	677
	13:00	658
	14:00	672
	15:00	662
	18:00	590
10	19:00	584
	20:00	590
	12:00	509
	13:00	490
13	14:00	470
	16:00	480
	17:30	462
	19:00	459
	12:00	500
	13:00	498
14	15:40	521
	17:00	531
	18:00	541
	19:00	553
	20:00	554
	12:00	535
15	14:00	541
	15:30	542
	17:00	538
	19:00	539
	08:00	255
16	09:00	245
	10:30	233
	14:00	230
	18:00	232
17	11:00	226
	13:00	222
	15:00	222
	16:30	222
20	11:00	191
	13:00	185
	15:00	184
20	11:30	148
	13:00	153

21	14:00	155
	15:00	155
	12:00	148
22	14:00	151
	15:00	152
	11:00	140
	13:00	142
23	14:00	146
	15:00	142
	17:00	142
	19:30	144
24	11:00	134
	19:30	130
	08:00	124
	11:00	125
	12:00	124
	13:00	123
27	14:00	121
	17:00	117
	10:40	93
	12:15	83
	15:00	83
28	16:00	82
	17:00	79
	19:45	70
	11:00	68
	12:40	69
29	14:00	67
	15:00	70
	17:00	71
	18:30	71
	10:30	65
	11:30	65
30	13:00	65
	15:00	65
	16:00	64
	17:00	64
30	19:30	67
	11:00	67
30	12:00	67



CCM 8

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	15:40	48
	17:00	62
	18:00	60
	19:00	60
	20:00	60
2	12:00	32
	14:00	27
	15:30	23
	17:00	23
	19:00	23
3	08:00	99
	09:00	95
	10:30	95
	14:00	91
	18:00	73
4	11:00	138
	13:00	131
	15:00	142
	16:30	148
5	11:00	277
	13:00	262
	15:00	251
8	11:30	773
	13:00	780
	14:00	788
	15:00	777
9	12:00	795
	14:00	794
	15:00	796
10	11:00	812
	13:00	813

	14:00	815
	15:00	813
	17:00	815
	19:30	821
11	11:00	826
	19:30	859
12	08:00	890
	11:00	829
	12:00	828
	13:00	827
	14:00	822
	17:00	819
15	10:40	820
	12:15	824
	15:00	788
	16:00	791
	17:00	811
	19:45	810
	16	11:00
12:40		817
14:00		818
15:00		817
17:00		820
18:30		820
17	10:30	823
	11:30	817
	13:00	812
	15:00	816
	16:00	821
	17:00	823
18	19:30	823
	11:00	813
	12:00	821



CCM 9

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	15:40	36
	17:00	36
	18:00	43
	19:00	55
	20:00	56
2	12:00	108
	14:00	103
	15:30	100
	17:00	100
	19:00	100
3	08:00	123
	09:00	124
	10:30	124
	14:00	121
	18:00	120
4	11:00	154
	13:00	156
	15:00	160
	16:30	167
5	11:00	294
	13:00	211
	15:00	211
8	11:30	615
	13:00	629
	14:00	631
	15:00	640
9	12:00	670
	14:00	685
	15:00	695
10	11:00	286
	13:00	397
	14:00	448
	15:00	460
	17:00	450
	19:30	450
11	11:00	276
	19:30	239
12	08:00	209
	11:00	226

	12:00	241
	13:00	260
	14:00	298
	17:00	421
15	10:40	259
	12:15	266
	15:00	288
	16:00	277
	17:00	282
	19:45	283
16	11:00	162
	12:40	153
	14:00	130
	15:00	105



Microalgas CCM 1

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	10:00	0
	12:00	55
	14:00	89
	16:00	122
	18:00	168
2	10:00	197
	12:00	234
	14:00	278
	16:00	321
3	10:00	389
	12:00	465
	14:00	497
	16:00	589
4	10:00	712
	12:00	745
	14:00	768
	16:00	801
5	10:00	852
	12:00	876
	14:00	901
	16:00	924
6	10:00	970
	12:00	1022
	14:00	1034
	16:00	1056
7	10:00	1102
	12:00	1125
	14:00	1151
	16:00	1168
8	10:00	1211
	12:00	1225
	14:00	1243
	16:00	1254

9	18:00	1267
	10:00	1275
	12:00	1279
	14:00	1278
	16:00	1281
10	18:00	1283
	10:00	1283
	12:00	1280
	14:00	1282
11	16:00	1285
	18:00	1283
	10:00	1275
12	12:00	1276
	14:00	1276
	16:00	1275
	18:00	1278
13	10:00	1277
	12:00	1283
	14:00	1282
	16:00	1283
14	18:00	1284
	10:00	1282
	12:00	1285
	14:00	1280
15	16:00	1281
	18:00	1284
	10:00	1280
	12:00	1283
16	14:00	1283
	16:00	1284
	18:00	1284
	10:00	1283
17	12:00	1284
	14:00	1285
	16:00	1285
	18:00	1284



Microalgas CCM 2

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	10:00	0
	12:00	56
	14:00	104
	16:00	149
	18:00	204
2	10:00	279
	12:00	331
	14:00	367
	16:00	412
	18:00	475
3	10:00	589
	12:00	614
	14:00	678
	16:00	702
	18:00	757
4	10:00	791
	12:00	809
	14:00	824
	16:00	858
	18:00	880
5	10:00	901
	12:00	923
	14:00	946
	16:00	969
	18:00	991
6	10:00	1014
	12:00	1037
	14:00	1059
	16:00	1082
	18:00	1105
7	10:00	1128
	12:00	1150
	14:00	1173
	16:00	1196
	18:00	1218
8	10:00	1241
	12:00	1248
	14:00	1245
	16:00	1256

9	18:00	1251
	10:00	1249
	12:00	1252
	14:00	1254
	16:00	1257
10	18:00	1262
	10:00	1256
	12:00	1256
	14:00	1258
	16:00	1258
11	18:00	1261
	10:00	1255
	12:00	1258
	14:00	1257
	16:00	1261
12	18:00	1264
	10:00	1258
	12:00	1256
	14:00	1260
	16:00	1264
13	18:00	1268
	10:00	1272
	12:00	1276
	14:00	1280
	16:00	1284
14	18:00	1288
	10:00	1292
	12:00	1296
	14:00	1300
	16:00	1304
15	18:00	1308
	10:00	1312
	12:00	1316
	14:00	1320
	16:00	1324
18:00	1328	



Elodea Canadensis CCM 1

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	10:00	0
	12:00	24
	14:00	35
	16:00	52
	18:00	62
2	10:00	76
	12:00	89
	14:00	102
	16:00	115
3	10:00	128
	12:00	142
	14:00	168
	16:00	191
4	10:00	201
	12:00	236
	14:00	278
	16:00	302
5	10:00	325
	12:00	356
	14:00	359
	16:00	407
6	10:00	433
	12:00	459
	14:00	478
	16:00	488
7	10:00	547
	12:00	581
	14:00	601
	16:00	643
8	10:00	697
	12:00	701
	14:00	712
	16:00	718
9	10:00	723
	12:00	735
	14:00	737
	16:00	742
10	10:00	757
	12:00	762
	14:00	773
	16:00	786
11	10:00	809
	12:00	832
	14:00	855
	16:00	860
12	10:00	860
	12:00	858
	14:00	859
	16:00	859
13	10:00	862
	12:00	862
	14:00	861
	16:00	864
14	10:00	859
	12:00	863
	14:00	863
	16:00	865
15	10:00	868
	12:00	862
	14:00	865
	16:00	868
16	10:00	868
	12:00	869
	14:00	871
	16:00	869
17	10:00	865
	12:00	867
	14:00	869
	16:00	872
18	10:00	875
	12:00	872
	14:00	873
	16:00	874
19	10:00	876
	12:00	876
	14:00	874
	16:00	876
20	10:00	880
	12:00	880
	14:00	880
	16:00	880

9	18:00	773
	10:00	786
	12:00	809
	14:00	832
	16:00	855
10	18:00	860
	10:00	860
	12:00	858
	14:00	859
11	16:00	859
	18:00	862
	10:00	857
	12:00	859
12	14:00	859
	16:00	861
	18:00	864
	10:00	859
13	12:00	863
	14:00	863
	16:00	865
	18:00	868
14	10:00	862
	12:00	865
	14:00	868
	16:00	869
15	18:00	871
	10:00	865
	12:00	867
	14:00	869
16	16:00	872
	18:00	875
	10:00	872
	12:00	873
17	14:00	874
	16:00	876
	18:00	880
	10:00	872



Elodea Canadensis CCM 2

Día	Hora	Voltaje (mV)
1	10:00	0
	12:00	23
	14:00	36
	16:00	57
	18:00	63
2	10:00	78
	12:00	91
	14:00	102
	16:00	115
3	10:00	128
	12:00	142
	14:00	193
	16:00	213
4	10:00	256
	12:00	278
	14:00	301
	16:00	323
5	10:00	379
	12:00	407
	14:00	448
	16:00	489
6	10:00	501
	12:00	523
	14:00	531
	16:00	540
7	10:00	571
	12:00	598
	14:00	624
	16:00	656
8	10:00	697
	12:00	712
	14:00	735
	16:00	746
9	10:00	778
	12:00	797
	14:00	801
	16:00	831
10	10:00	832
	12:00	833
	14:00	834
	16:00	836

9	18:00	834
	10:00	836
	12:00	837
	14:00	838
	16:00	839
10	18:00	841
	10:00	842
	12:00	843
	14:00	844
11	16:00	846
	18:00	847
	10:00	848
	12:00	849
12	14:00	851
	16:00	852
	18:00	853
	10:00	854
13	12:00	856
	14:00	857
	16:00	858
	18:00	859
14	10:00	861
	12:00	862
	14:00	863
	16:00	864
15	18:00	866
	10:00	867
	12:00	867
	14:00	869
16	16:00	872
	18:00	875
	10:00	872
	12:00	873
17	14:00	874
	16:00	876
	18:00	880
	10:00	880



CCM Final

Día	Hora	Voltaje CCM Final (mV)
1	10:00	0.5
	12:00	0.62
	14:00	0.757
	16:00	0.898
	18:00	1.01
2	10:00	1.23
	12:00	1.56
	14:00	1.74
	16:00	1.94
	18:00	2.2
3	10:00	2.43
	12:00	2.66
	14:00	2.89
	16:00	3.12
	18:00	3.36
4	10:00	3.59
	12:00	3.82
	14:00	4.05
	16:00	4.31
	18:00	4.78
5	10:00	4.97
	12:00	5.42
	14:00	5.75
	16:00	6.1
	18:00	6.45
6	10:00	6.8
	12:00	7.16
	14:00	7.51
	16:00	7.86
	18:00	8.21
7	10:00	8.57
	12:00	8.92
	14:00	9.27
	16:00	9.62
	18:00	9.97
8	10:00	10.33
	12:00	10.68
	14:00	11.03
	16:00	11.38
	18:00	11.73
9	10:00	12.09

	12:00	12.44
	14:00	12.79
	16:00	13
	18:00	13
10	10:00	14
	12:00	14.2
	14:00	14.55
	16:00	14.9
	18:00	15.21
11	10:00	15.31
	12:00	15.38
	14:00	15.41
	16:00	15.43
	18:00	15.49
12	10:00	15.43
	12:00	15.47
	14:00	15.48
	16:00	15.49
	18:00	15.51
13	10:00	15.52
	12:00	15.53
	14:00	15.54
	16:00	15.55
	18:00	15.57
14	10:00	15.58
	12:00	15.59
	14:00	15.60
	16:00	15.61
	18:00	15.63
15	10:00	15.64
	12:00	15.65
	14:00	15.66
	16:00	15.67
	18:00	15.69

