



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

PROPUESTA Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS
EXPERIMENTALES DIDÁCTICOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE
MICROBIANAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

TESIS CONJUNTA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERIA CIVIL

P R E S E N T A N:

**LUIS FERNANDO REYES ORTÍZ
Y
PEDRO SÁNCHEZ ESQUIVEL**

ASESOR: M. EN C. SERGIO ALFONSO MARTÍNEZ GONZÁLEZ



Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2019





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.

Dedicatoria

Luis

El presente trabajo se lo quiero dedicar a mis padres por su gran apoyo a lo largo de mi carrera educativa, formación como ser humano, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, por su apoyo para creer y confiar en mí, por los valores, consejos y principios que me han inculcado. A mi familia que me enseñó el valor del amor y la unidad, por estar conmigo en todo momento, por acompañarme en este gran camino y creer en mí. A mis profesores por ser esa gran motivación para destacar como grandes profesionales, por sus grandes conocimientos brindados, por su paciencia, dedicación, apoyo y confianza. A mis amigos por ese gran apoyo incondicional, por su tiempo, su amistad, su comprensión y a esas personas que algún día formaron parte de mi vida y que ahora ya no están. Gracias a todos por su ayuda y buena voluntad.

Pedro

Este trabajo se lo quiero dedicar a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mi vida para poder llegar hasta este momento y que me impulsan a seguir adelante. Se la dedico primeramente a mis Padres quienes siempre buscaron educarme para que yo lograra superarme, les agradezco todo ese esfuerzo y ese apoyo incondicional a cualquier cosa que yo me propusiera. En segundo lugar, me gustaría dedicársela a Claudia (Búho) Q.D.E.P. quien también me apoyo desde pequeño y que durante mi etapa en el bachillerato fue como una segunda madre y que la última vez que tuve oportunidad de hablar con ella me insistió en que quería que le llevara mi título. Por último, se lo quiero dedicar a todos esos amigos y familia a quienes descuidé un poco durante ese periodo en el que me fui a estudiar a otra ciudad y les dediqué menos tiempo y a pesar de esto siempre me han apoyado para poder salir adelante.

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a nuestro asesor el **M. en C. Sergio Alfonso Martínez González**, por su profesionalismo y entrega al no limitarse únicamente a lo mínimo como asesor sino dar un verdadero seguimiento a lo largo de todo este proyecto, desde el principio hasta la conclusión de este trabajo, y a su vez agradecemos a la **DGAPA** de la **UNAM** que a través del proyecto **PAPIME PE105816** fue posible llevar a cabo el desarrollo de esta tesis también agradecemos también a la **M. en C. Marjorie Márquez Vázquez** quien también nos asesoró y apoyo para que este trabajo fuese posible.

Gracias a todos los profesores de la carrera que fueron más allá del plan de estudios que siempre buscaron dejar un verdadero aprendizaje, quienes no simplemente buscaban formar egresados, sino Ingenieros de bien, con ética y compromiso con la profesión y la sociedad, que se desvivían por llegar a clase y dejar una huella en nosotros.

Por último, gracias a la **Universidad Nacional Autónoma de México** que fue una segunda casa para nosotros, donde pasábamos la mayor parte de nuestros días durante nuestra vida estudiantil, gracias a esta casa de estudios porque siempre había espacios y recursos en óptimas condiciones para nuestro desarrollo que sin esto hubiese sido más complicado el aprendizaje obtenido e inclusive esta tesis no hubiera obtenido los alcances obtenidos

Tabla de contenido

Tabla de Contenido (Figuras)	v
Tabla de Contenido (Fotografías)	vii
Tabla de Contenido (Tablas).....	ix
Tabla de Contenido (Gráficas).....	x
Introducción	1
Escases del agua.....	1
Sobreexplotación de acuíferos	3
Contaminación del agua.....	5
Contaminación atmosférica	6
Justificación	8
Objetivos.....	11
Capítulo I. Celda de Combustible de Hidrógeno	12
Antecedentes.....	13
Tipos de celda de combustible.....	14
Ventajas de las celdas de combustible	19
Celdas de combustible microbianas.....	20
Demanda Química de Oxígeno.....	20
Composición básica de una celda de combustible microbiana.....	21
Celdas de Combustible Microbianas de Flujo Continuo.	23

Celda de Combustible Microbiana tipo Humedal.....	27
Procesos de remoción.....	27
Celda de combustible microbiana implementado en humedal	28
Capítulo II. Propuestas de diseño de Celdas de combustible microbianas.....	33
Capítulo III. Proceso constructivo de Celdas de Combustible Microbianas.....	37
Cortes y ensamble de celdas de combustible microbianas y dispositivos auxiliares.....	37
Diseño de electrodos.....	40
Ensamble de Celda de Combustible Microbiano de Flujo Continuo.....	41
Ensamble de celda de combustible microbiano tipo humedal	42
Selección del sustrato.....	43
Placa de fibra de vidrio	43
Armado de humedal.....	44
Puesta en marcha de las Celdas	46
Capítulo IV. Resultados y Conclusiones.....	48
Resultados.....	48
Conclusiones.....	53
Uso de los dispositivos.....	57
Referencias.....	58

Tabla de Contenido (Figuras)

Imagen 1. Total de recursos hídricos renovables m ³ per cápita por año (FAO, 2014)	3
Imagen 2. Acuíferos sobreexplotados en México (en rojo) y principales centros urbanos (Martinez-Austria, 2019)	5
Imagen 3. Estructura plana simplificada Ánodo-Electrolito-Cátodo de una celda de Combustible (O'Hayre, Cha, G. Colella, & B. Prinz, 2016)	12
Imagen 4. Celda de William Grove (Fernández, 2009).	14
Imagen 6. Diagrama de una Pila de Combustible tipo PEM (Wikipedia, 2019).	16
Imagen 7. Esquema de la economía esperada del Hidrógeno (O'Hayre, Cha, G. Colella, & B. Prinz, 2016).	18
Imagen 8. El sistema de Celda de combustible microbiana formado por los compartimentos de ánodo y cátodo (Rahimnejad et al., 2015)	22
Imagen 9. Configuración de la Celda de Combustible Microbiana (Carmona, 2008)	25
Imagen 10. Celda de combustible microbiana de una sola cámara con baffles y con el ánodo en forma de escobillón (Cervantes, 2011)	25
Imagen 11. Procedimiento Experimental del estudio de influencia de los microorganismos en suspensión. A) Operación para evitar el crecimiento de microorganismos en suspensión. B) Operación que permitió el crecimiento de microorganismos en suspensión (González del Campo, 2015)	26
Imagen 12. Tipos de humedales y su conformación (Sosa & Leonel, 2015)	30
Imagen 13. Vista lateral y acomodo de mamparas de modelo de Celda de combustible Microbiana de Flujo Continuo.	34
Imagen 14. Perspectiva de Celda microbiana de flujo Continuo con sus componentes	35

Imagen 15. Modelo del tanque del Humedal 3D realizado en AutoCAD	35
Imagen 16. a) Vista frontal de render del conjunto de celdas. b) Vista Isométrica de render de celdas de combustible.	36
Imagen 17. Ejemplo de plano 2D hecho en CorelDRAW para llevar a la cortadora láser.....	36

Tabla de Contenido (Fotografías)

Fotografía 1. Cavando para beber agua en un lecho de río seco (UK Department for International Development, 2011).....	1
Fotografía 2. Aviadores salvan vidas en África con visita médica (U.S. Air Force, 2007).....	3
Fotografía 3. Sobreexplotación de mantos acuíferos en La Paz y los Cabos. (Diario La Paz, 2018)	4
Fotografía 4. Los escombros y la contaminación en el río Duque de Northumberland, Kendall Bridge, Isleworth, Londres (Linwood, 2009)	6
Fotografía 5. Contaminación en la CDMX el 14 de mayo de 2019 ocasionado por 62 incendios en el país rebasando el Índice de Calidad del Aire (ICA) (Vanguardia MX, 2019).....	8
Fotografía 6. Carro de Celda de Combustible de Hidrógeno Cargando (Ridgway, 2013).....	15
Fotografía 7. Corte de acrílico a láser en Cortadora Laser VERSA LASER VLS2.30	37
Fotografía 8. Ensamble de depósitos de efluente.....	38
Fotografía 9. a) Prueba de impermeabilidad del Depósito general. b) Prueba de impermeabilidad de la celda de combustible microbiana de flujo continuo antes de ser ensamblada con sus componentes.	39
Fotografía 10. a) Pintura de mueble de madera b) Ensamble de mueble de madera	39
Fotografía 11. Unión de placa y cable con soldadura de estaño.....	40
Fotografía 12. Corte de empaques para Celda de Combustible Microbiana de flujo continuo	41
Fotografía 13. Saturación de base humedal	42
Fotografía 14. Selección y lavado de sustrato (Tepojal).....	43
Fotografía 15. Membrana de fibra de vidrio colocada en el Humedal.	44

Fotografía 16. a) Llenado de humedal con sustrato colocando el ánodo. b) Sustrato en orden granulométrico con electrodos y membrana colocada.....	45
Fotografía 17. Planta colocada en el Humedal.	45
Fotografía 18. a) Deposito de Afluyente cubierto con vinil. b) Tapón Impreso en 3D	46
Fotografía 19. Conjunto de Celdas de combustible Microbianas en Operación.....	47

Tabla de Contenido (Tablas)

Tabla 1. Diseño metodológico	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Parámetros electroquímicos de la CCM alimentada con Agua residual sintética (Sotres et al., 2016)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Degradación de Sustrato a diferentes resistencias externas(Wen et al., 2009).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Tipos de celdas (Victoria Falco, 2016).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. DQO de afluente y efluente y voltaje de Celdas de Combustible Microbianas (Humedal y Flujo Continuo).....	49

Tabla de Contenido (Gráficas)

Gráfica 1. Comportamiento de la DQO del influente y del efluente durante los 16 ciclos de operación de la CCM con baffles (Cervantes, 2011)	¡Error! Marcador no definido.
Gráfica 2. Remoción de la materia expresada como DQO con TRH de 2 y 4 días (Sosa & Leonel, 2015)	30
Gráfica 3. Concentración de SSV con TRH de 2 y 4 días (Sosa & Leonel, 2015).....	31
Gráfica 4. Remoción promedio de mercurio (Sosa & Leonel, 2015)	31
Gráfica 5. Remoción promedio de cromo (Sosa & Leonel, 2015)	32
Gráfica 6. Remoción promedio de plomo (Sosa & Leonel, 2015)	32
Gráfica 7. DQO de Afluente y Efluente de la Celda de Combustible Microbiana tipo Humedal	50
Gráfica 8. DQO de Afluente y Efluente de la Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo	50
Gráfica 9. Comparativa en % de Remoción de DQO entre la Celda de Combustible Tipo Humedal y la de Flujo Continuo.....	51
Gráfica 10. Comparativa en voltaje entre la Celda de Combustible Tipo Humedal y la de Flujo Continuo.....	51

Introducción

Escases del agua

El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos. El agua también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático, y es el vínculo crucial entre la sociedad y el medioambiente (Organización de las Naciones Unidas, 2018).

El agua es considerada un recurso natural renovable, pero la problemática no es debido a la existencia de esta, sino a la cantidad que se encuentra disponible para consumo humano. Aproximadamente el 71% de la superficie terrestre se encuentra cubierta por agua, de esta el 0.76% es agua subterránea dulce, 0.007% es agua dulce en lagos, y 0.0002% se encuentra en ríos (U.S. Geological Survey, 2016), como se puede observar, este recurso es abundante. Sin embargo, si disponibilidad para uso y consumo humano es limitada.



Fotografía 1. Cavando para beber agua en un lecho de río seco (UK Department for International Development, 2011)

Ha surgido una crisis global en las últimas décadas por la calidad y cantidad de agua dulce, esto se debe a dos cambios importantes; el crecimiento de la población en el mundo y el crecimiento económico. Según un reporte de “World Water Vision: Making Water Everybody’s Business”, se estima que a nivel mundial el 20% tiene acceso a agua potable y el 50% no tiene acceso a un agua de buena calidad ya que el saneamiento no es el adecuado. (Díaz Caravantes, Bravo Peña, Alatorre Cejudo, & Sánchez Flores, 2015)

Aunado a la limitada cantidad de agua disponible nos vemos enfrentados a que la población va en aumento, la tasa de crecimiento media anual de la población en México entre 2010 y 2015 fue de 1.4% (INEGI, 2018), esto mientras la cantidad de agua disponible teóricamente sigue constante por lo que la cantidad per cápita se ve reducida.

Los recursos hídricos renovables totales per cápita en México se redujeron de 4,426 metros cúbicos por habitante por año entre 1998 y 2002 a 3,576 metros cúbicos por habitante por año entre 2013 y 2017 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018), dando una reducción del 19.2% aproximadamente en 15 años.

México tiene una superficie de 1,964,375 km² de la cual la superficie agrícola es de aproximadamente 1,062,360 km². Se extraen anualmente en México alrededor de 80,300 millones m³ al año de los cuales el sector agrícola ocupa 61,580 millones de m³ al año. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018)

Los conflictos ocasionados por el agua son una realidad, en el mundo se han registrado 551 conflictos por el agua de estos 263 se han registrado desde 2010 a la fecha, siendo un ejemplo reciente las protestas en Irán por la crisis de agua el 29 de marzo de 2018 (The World's Water, 2018).

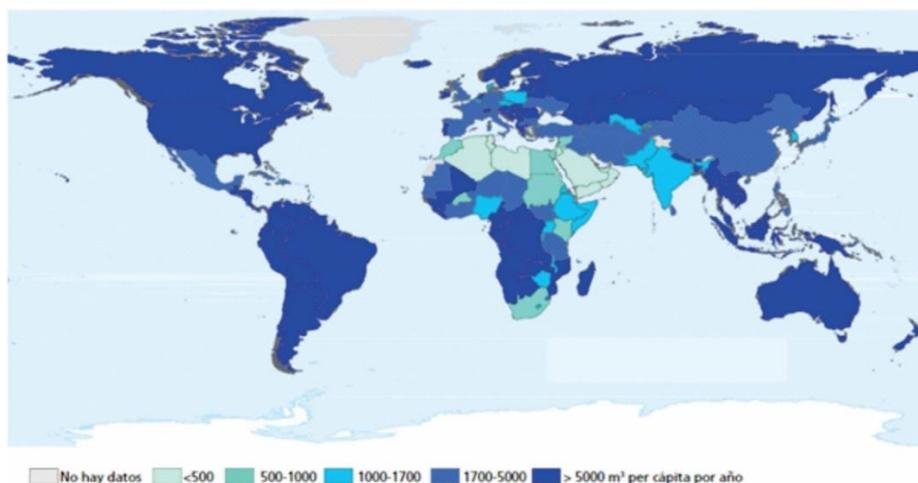


Imagen 1. Total de recursos hídricos renovables m³ per cápita por año (FAO, 2014)

El agua no potable y el saneamiento deficiente son las causas principales de la mortalidad infantil. La diarrea infantil asociada a la escasez de agua, saneamientos inadecuados, aguas contaminadas con agente patógenos de enfermedades infecciosas y falta de higiene causa la muerte a 1.5 millones de niños al año, la mayoría de ellos menores de cinco años en países en desarrollo (Organización de las Naciones Unidas, 2018).



Fotografía 2. Aviadores salvan vidas en África con visita médica (U.S. Air Force, 2007)

Sobreexplotación de acuíferos

Otro gran problema que se ha presentado en el país es la sobreexplotación de los mantos acuíferos debido a que se extrae mas agua de la que se recarga. México contaba en el 2009 con 653 acuíferos de los cuales mas de 100 acuíferos estaban siendo sobreexplotados y esta cifra

representaba el 53.6% de agua subterránea extraída. Es una cifra alarmante, ya que más de la mitad de agua subterránea tiene origen de acuíferos sobreexplotados.

Éste hecho origina a su vez mas problemas como: la salinización de los suelos que afectan al sector agrícola, ya que limitan la producción de alimentos y la presencia de aguas subterráneas salobres donde el agua adquiere un grado de salinidad y debe tener un tratamiento más costoso para convertirla en potable. Principalmente, estos problemas fueron muy notorios en el 2010 en Baja California y el altiplano mexicano. (Díaz Caravantes et al., 2015)



Fotografía 3. Sobreexplotación de mantos acuíferos en La Paz y los Cabos. (Diario La Paz, 2018)

La mayor parte de acuíferos sobreexplotados están al norte y centro del país, donde predomina un clima árido o semiárido, ya que la precipitación anual que existe esta por debajo de los 500 mm/año. El problema se hace más grave, ya que el mayor crecimiento poblacional y económico se produce en estas zonas donde la precipitación pluvial es menor a la del sureste del país donde se registran hasta 2400 mm/año. (Díaz Caravantes et al., 2015)

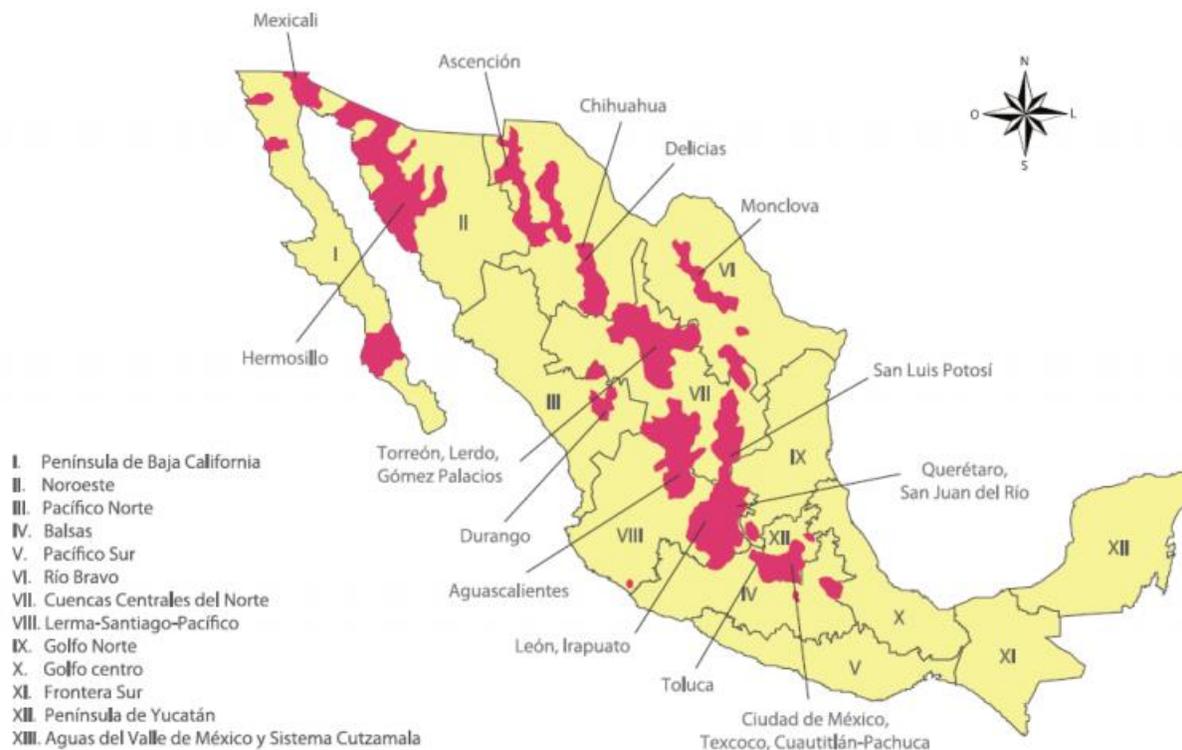


Imagen 2. Acuíferos sobreexplotados en México (en rojo) y principales centros urbanos (Martínez-Austria, 2019)

Los problemas también se llegaron a presentar en donde los acuíferos se ubicaban en zonas costeras del país, ya que había intrusión de agua de mar en 18 acuíferos.

Contaminación del agua

La contaminación del agua es la presencia de componentes químicos, físicos o biológicos que produzcan una condición de deterioro a un cuerpo de agua. Las fuentes de agua contaminada transmiten enfermedades a la población y las regiones en desarrollo son las que se ven más afectadas por esto.

Una posible causa de fuentes de agua contaminada para uso público podrían ser los tratamientos inadecuados, sistemas de desinfección defectuosos o instalaciones de tratamiento en mal estado.

En México, durante 2016 se trató el 58.3% del agua recolectada en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2017), esto implica que el 41.7% restante se descarga sin algún tratamiento, todo esto sin considerar las descargas que ni siquiera son controladas porque no forman parte de un sistema de alcantarillado y llegan directamente a cuerpos receptores.



Fotografía 4. Los escombros y la contaminación en el río Duque de Northumberland, Kendall Bridge, Isleworth, Londres (Linwood, 2009)

Contaminación atmosférica

Es uno de los problemas más grandes a los que actualmente se enfrenta la humanidad debido a que atenta contra la vida, esto ha sido ocasionado gracias a la creciente urbanización, la deforestación, la producción de energía, el uso de plaguicidas y los malos hábitos.

Contaminantes que se encuentran en la atmosfera como el plomo, ozono, nitrógeno, carbono, hidrocarburos y clorofluorocarburos tienen un impacto en la salud alarmante y provocan un daño en la atmosfera crítico. (Pérez N. M., 2007)

En el caso del plomo y ozono, pueden ser absorbidas por la piel y la respiración causando daños cardiacos y renales, cáncer pulmonar, hipertensión arterial, complicaciones en el estado de salud.

El monóxido de carbono y dióxido de carbono provenientes de la combustión, los óxidos de nitrógeno debido al uso de fertilizantes, automotores, hornos y productos de limpieza afectan directamente la temperatura de la tierra debido al aumento de gases de efecto invernadero que traen consigo el deshielo de los glaciares, aumento del nivel del mar, cambios climáticos, cambio en la reproducción de insectos y microorganismos debido a la temperatura.

Los hidrocarburos como el metano, propano y butano originados por automotores, procesos industriales, disolventes, descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno también generan gases de efecto invernadero. (Pérez N. M., 2007)

A su vez la Industria de la Generación de Energía Eléctrica en México resulta ser muy contaminante ya que el principal tipo de planta generadora es la Termoeléctrica con un 55.6% la cual emplea la combustión de hidrocarburos tales como petróleo, gas y Diesel (INEGI, 2009).

El Gas de Efecto Invernadero más abundante, el dióxido de carbono (CO_2) es el resultado de la quema de combustibles fósiles (Organización de las Naciones Unidas, 2018). México emite anualmente 188 millones de toneladas de carbono, el 2% de emisiones mundiales de gases con efecto invernadero.

La sobre generación de dichos gases nos trae como consecuencia el calentamiento global, la temperatura promedio global sobre superficies terrestres y oceánicas del 2017 fue la tercera más alta desde el comienzo de los registros en 1880, según los científicos de la NOAA.

La desviación de la temperatura global de la superficie de la tierra y el océano en diciembre de 2017 fue el cuarto más caluroso en el registro de 138 años (National Centers for Environmental Information, 2018).



Fotografía 5. Contaminación en la CDMX el 14 de mayo de 2019 ocasionado por 62 incendios en el país rebasando el Índice de Calidad del Aire (ICA) (Vanguardia MX, 2019)

Justificación

Debido a la combinación de los factores anteriormente mencionados se debe comenzar a tener una visión a futuro, ya que habrá muchas consecuencias a nivel global para la vida en el planeta, el buscar generar alternativas que nos permitan reducir estos fenómenos se vuelven un punto esencial, puesto que no pueden ser mitigados por completo, pero si pueden amortiguar el impacto y garantizar la supervivencia de nuestra especie.

El crecimiento poblacional, a pesar de tener un decremento, sigue siendo parte importante del problema, ya que la tasa no se reducirá drásticamente, esto implica que el consumo energético, el consumo de agua y el aumento de la contaminación seguirán siendo problemas que se tendrán que combatir.

En cuanto al consumo energético no se trata de reducirlo, se tiene que usar de forma más responsable aprovechando al máximo los recursos y migrando a nuevas tecnologías, sin embargo, como vimos las fuentes de energía que se emplean actualmente nos generan situaciones adversas

que hoy en día tienen consecuencias muy marcadas, por lo que se debe optar por la búsqueda de fuentes más limpias y eficientes.

Por otra parte, el agua a pesar de ser considerado un recurso renovable que en su caso para que éste planteamiento sea válido, se debe buscar un equilibrio entre uso y reincorporación a los cuerpos de agua, no tener los niveles de sobreexplotación con los que se cuentan actualmente, en los cuales se ha tenido que obtener el agua de fuentes de un acceso más complicado y de menor calidad, lo cual también implica un costo más elevado, tanto por los medios para su obtención como para su potabilización.

Se debe buscar mantener la explotación a un ritmo similar al de la reincorporación a los cuerpos de agua en las condiciones adecuadas, no solo las descargas de aguas servidas, el regresar un agua de mala calidad ya sea a cuerpos receptores o darle un segundo uso sin algún tratamiento puede implicar problemas a especies de flora y fauna e incluso problemas de salud para los seres humanos.

Por tal motivo, en este proyecto se busca desarrollar un par de modelos experimentales didácticos relativamente recientes llamado Celda de Combustible Microbiana (CCM), las cuales buscan recuperar los electrones liberados por los microorganismos mientras éstos se encuentran degradando la materia orgánica.

Todo esto debido a que en este proceso pretende aportar en dos rubros muy importantes de los mencionados anteriormente, un proceso biológico para el tratamiento de agua residual que a su vez busca tener un aporte en la generación de energía eléctrica sin tener un impacto significativo para el medio ambiente.

Para analizar su funcionamiento se desarrollarán dos modelos, uno de una Celda de Combustible Microbiana de flujo continuo con una PEM (por sus siglas en inglés Proton Exchange Membrane) Nafion™ 117 y el otro modelo a desarrollar será una Celda de Combustible Microbiana tipo Humedal, estos con el fin de que futuras generaciones de la carrera puedan tener Acceso a dicho modelo e incluso, poder hacer modificaciones que permitan mejorar su funcionamiento, esto gracias al apoyo del laboratorio de Ingeniería Ambiental del Centro Tecnológico Aragón por medio del Proyecto PAPIME PE105816 dirigido por el M. en C. Sergio Alfonso Martínez González.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir dos diferentes modelos experimentales de celdas de combustible microbianas, que ayude a depurar el agua residual y, además, produzcan electricidad.

Objetivos Específicos

- Buscar diseños previos de modelos a escala de Celdas de Combustible Microbianas.
- Proponer un diseño de un modelo a escala de una Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo y otro Tipo Humedal.
- Poner en operación los modelos de las Celdas de Combustible Microbianas.
- Medir y comparar el comportamiento de los modelos experimentales de las celdas de combustible microbianas.

Diseño metodológico

Tabla 1. Diseño metodológico

Objetivo	Actividad
<i>Buscar diseños previos de modelos a escala de Celdas de Combustible Microbianas.</i>	Recopilar información sobre celdas de combustible.
	Indagar sobre modelos realizados previamente.
<i>Proponer un diseño de un modelo a escala de una Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo y otro Tipo Humedal.</i>	Seleccionar los modelos en los que se basaran.
	Diseñar un diagrama del sistema.
	Proponer dimensiones y materiales a emplear.
<i>Poner en operación los modelos de las Celdas de Combustible Microbianas</i>	Construir los modelos experimentales.
	Poner en marcha los modelos experimentales.
<i>Medir y comparar el comportamiento de los modelos experimentales de las celdas de combustible microbianas.</i>	Medir DQO de entrada y salida de cada celda.
	Medir el voltaje de las celdas.

Capítulo I. Celda de Combustible de Hidrógeno

Una Celda de Combustible, también llamada pila de combustible, es un dispositivo electroquímico de conversión energética, mediante la transformación de una reacción química a energía eléctrica, se emplea un combustible, comúnmente hidrógeno y un oxidante el más usado es el oxígeno (Behling, 2013), esto ocasiona una reacción química produciendo energía limpia .

Las celdas de combustible generan energía eléctrica como producto y los subproductos, consecuencia de la reacción, son agua y calor. Una celda de combustible trabaja similar a una batería, salvo que esta última está diseñada como una fuente de energía eléctrica portátil que debe almacenar todos los químicos necesarios para ser abastecida, así que una vez que estos se terminan la batería deja de funcionar.

En contraste una celda de combustible no contiene algún químico por sí misma, simplemente cuenta con una cámara donde se genera la reacción. El combustible necesario es proveído de manera externa así que mientras este siga siendo suministrado la celda seguirá funcionando. A pesar de que algunas celdas se han diseñado para ser portátiles como las baterías, muchos diseños han sido desarrollados para una función estacionaria haciendo una limitada portabilidad (Spiegel, 2008).

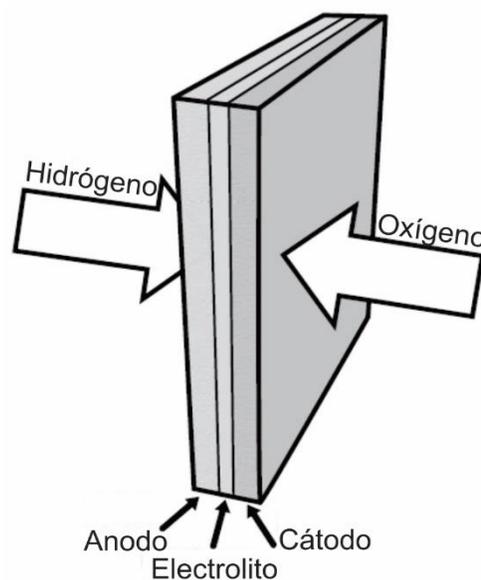


Imagen 3. Estructura plana simplificada Ánodo-Electrolito-Cátodo de una celda de Combustible (O'Hayre, Cha, G. Colella, & B. Prinz, 2016).

La corriente producida por una celda de combustible es proporcional al tamaño del área de reacción en donde los reaccionantes, el electrodo y electrolito se encuentran. En otras palabras, duplicando el área de contacto de las celdas de combustible se aproxima a duplicar la cantidad de

corriente producida. Mientras que esta explicación puede parecer un tanto intuitiva, como se ha mencionado la celda de combustible producen electricidad mediante la conversión de una fuente de energía primaria (un combustible) en un flujo de electrones.

Actualmente la energía eléctrica se almacena en baterías o capacitores y cada método de almacenamiento tiene sus ventajas y desventajas, a corto plazo las baterías parecen más factibles, pero a largo plazo las sustancias químicas son preferibles, las baterías no son adecuadas para un almacenamiento a largo plazo debido a su autodescarga (Pérez & Maira, 2011).

La diferencia en conclusión entre una batería o pila y una celda de combustible es el reactivo que utilizan y su tiempo de vida, mientras que las pilas y baterías utilizan reactivos sólidos como metales, una vez agotado el reactivo estas ya no son útiles, a diferencia de las celdas de combustible que utilizan reactivos líquidos o gaseosos y mientras tengan suministro de combustible estas podrán operar indefinidamente. (García, 2015)

Antecedentes

La primera celda de combustible fue desarrollada por William Grove en 1842, quien a través de cuatro celdas primitivas logró producir energía eléctrica, dichas celdas utilizaban hidrógeno y oxígeno. En 1959 Francis Thomas Bacon desarrolló una celda inmóvil de combustible, a su vez Pratt & Whitney Aircraft y General Electric desarrollaron la primera celda de combustible con membrana de intercambio de protones (Fernández, 2009).

Las primeras celdas fueron empleadas por la NASA, para su programa espacial tripulado, una aplicación donde el costo era irrelevante mientras este dispositivo funcionara de manera eficiente. Mientras tanto las investigaciones durante la segunda mitad del siglo XX llevaron al

desarrollo de nuevas tecnologías de celda de combustible, una celda comercial para emplearse de manera estacionaria fue lanzada en 1992 basada en la celda de combustible de ácido fosfórico.

Los costos siguen siendo elevados, sin embargo, el funcionamiento continuo ha hecho que el desarrollo de esta tecnología ha hecho que disminuya el costo. Adicionalmente, la industria automotriz, ha identificado otro tipo de celda de combustible, la celda de combustible con membrana de intercambio protónico como una fuente de energía para reemplazar los motores de pistón (Spiegel, 2008).

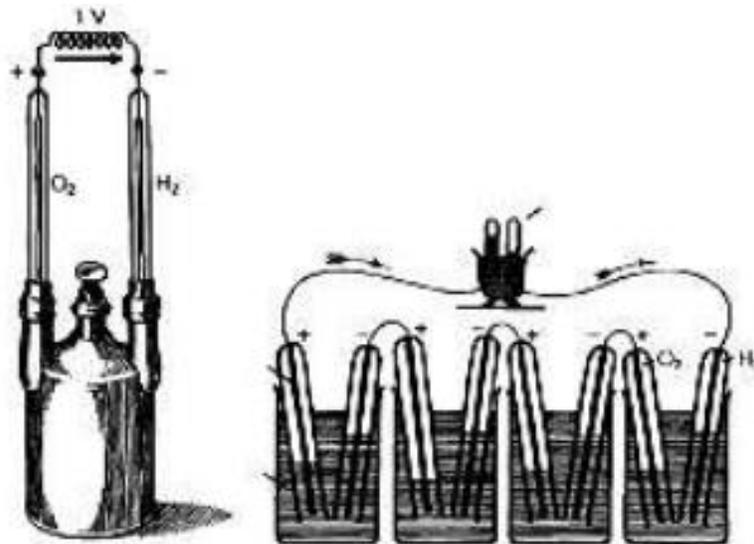


Imagen 4. Celda de William Grove (Fernández, 2009).

Tipos de celda de combustible

Existen diversos tipos de celdas de combustible, entre ellas se encuentran:

- Celdas de Combustible con Membranas de Intercambio Protónico (PEMFC). Actúan a temperaturas alrededor de 80°C y dentro de sus ventajas se tiene mayor densidad de potencia, así como de vida útil.



Fotografía 6. Carro de Celda de Combustible de Hidrógeno Cargando (Ridgway, 2013)

- Celda de Combustible de Metanol Directo (DMFC). Es una pequeña celda la cual tipo PEMFC, la diferencia es que trabaja con metanol y dicha celda es empleada en aplicaciones portátiles.
- Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC). Operan a una temperatura arriba de 650 y hasta 1000° C y produce vapor, Dióxido de Carbono y Electricidad, su empleo puede ser a pequeña o gran escala, en sistemas de alta potencia como pueden ser plantas de generación eléctrica para edificios o conjuntos habitacionales.
- Celdas de Combustible Alcalinas. Son uno de los diseños más viejos, eran usadas desde 1960 en programas espaciales de Estados Unidos, trabaja a temperaturas entre 150 y 200°C, el costo de estas es muy elevado pues requiere hidrogeno y oxigeno puros comprimidos, por tal motivo es poco comercial.
- Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC). Trabaja a temperaturas entre 150 y 250°C por lo cual no se recomienda su uso en automóviles.

- Celda de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC). Actúa a temperaturas alrededor de 650°C, es la más recomendada para grandes sistemas de potencia, su construcción y operación son más económicas, puesto que emplea níquel como catalizador e hidrocarburos como combustible.
- Celda de Combustible Microbiana (MFC). Trabajan con bacterias oxidando la materia orgánica del agua residual. (Landeros A., Matabuena C., & Solorza F., 2006).

Dentro de las celdas de combustible listadas anteriormente, las más comunes son las celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico (Proton exchange membrane, PEM). Su forma de operar consiste en que el hidrógeno fluye por el ánodo y es desasociado en la capa catalizadora formando protones y electrones, los protones pasan a través de la membrana por lo que los electrones son forzados a pasar por un circuito externo generando para posteriormente reaccionar con los protones en el cátodo con el oxígeno en donde se forma agua (Tibaquirá G. & Posner, 2009).

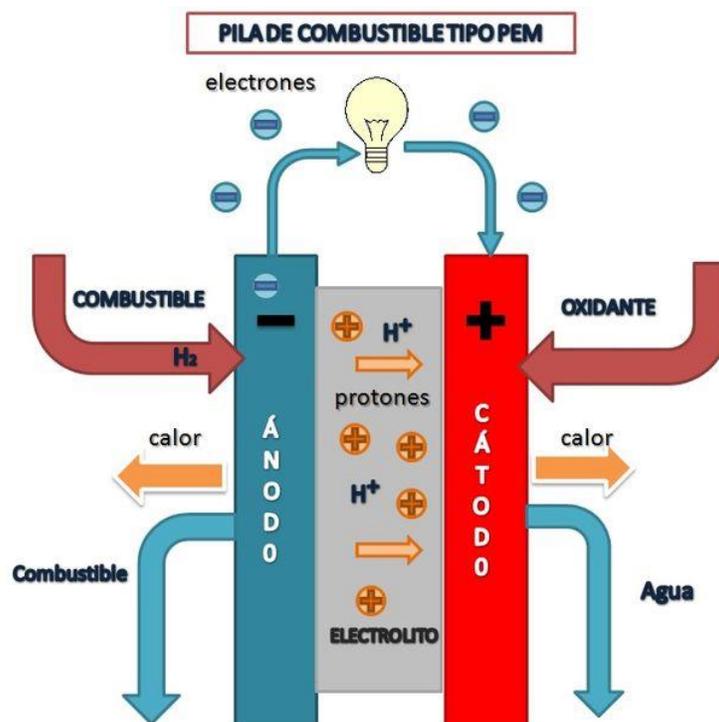
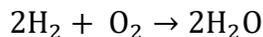
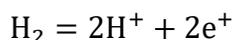


Imagen 5. Diagrama de una Pila de Combustible tipo PEM (Wikipedia, 2019).

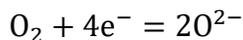
La reacción entre el hidrógeno y el oxígeno es exotérmica. Esta reacción se puede expresar de mediante una simple fórmula química:



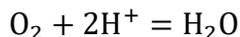
La fórmula nos muestra dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno reaccionando para crear dos moléculas de agua. A pesar de que la fórmula aparenta ser simple, en realidad es un proceso complejo que puede ser dividido en tres reacciones parciales. La primera de éstas involucra la molécula de hidrógeno dividiéndose en dos átomos de hidrógeno y cada uno liberando un electrón para formar un ion de hidrógeno con carga positiva.



Una segunda reacción parcial paralela involucra la molécula de oxígeno, la cual se separa en dos átomos de oxígeno, cada uno absorbe dos electrones liberados por los dos átomos de hidrógeno produciendo un ion de doble carga negativa de oxígeno.



La tercera y última parte de la reacción involucra la la carga negativa del ion de oxígeno atrayendo los átomos de doble carga positiva de hidrógeno uniendo los tres iones para formar la molécula de agua (Breeze, 2018).



El hidrógeno es considerado uno de los combustibles más eficientes, sin embargo, no se encuentran de forma natural, por lo que este tiene que ser producido con otras fuentes de energía, en esta misma situación se encuentra la energía eléctrica la cual tiene que ser producida y

transportada, la diferencia está en que el hidrógeno se puede almacenar y puede almacenarse en forma gaseosa o líquida, lo más común es en tanques a altas presiones teniendo H₂ comprimido.

Actualmente, el hidrógeno es utilizado para diversas industrias, siendo aproximadamente el 99% producido de combustibles fósiles, principalmente por la reformación del gas natural. A pesar de esto existen otros métodos para producir hidrógeno como es la biomasa, la separación de agua por medios térmicos biológicos y solares; y la electrólisis del agua (Pérez & Maira, 2011).

Algunas celdas pueden ser diseñadas para operar de forma inversa, es decir, puede operar como Celda de Combustible, convirtiendo hidrógeno y oxígeno en agua y electricidad o pueden funcionar como electrolizador, convirtiendo el agua y electricidad en hidrógeno y oxígeno (O'Hayre, Cha, G. Colella, & B. Prinz, 2016) .

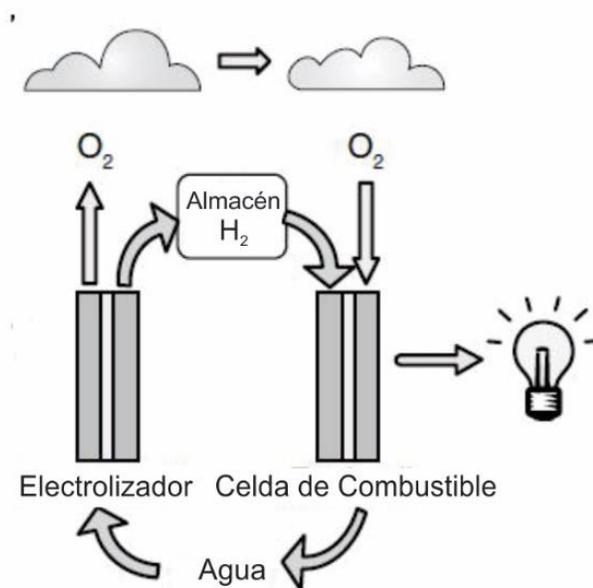
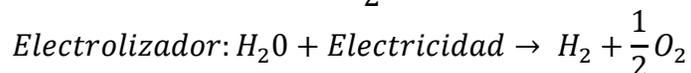
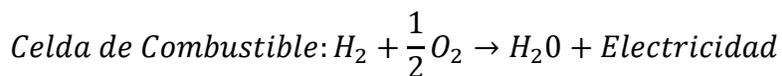


Imagen 6. Esquema de la economía esperada del Hidrógeno (O'Hayre, Cha, G. Colella, & B. Prinz, 2016).

Ventajas de las celdas de combustible

Como hemos visto las celdas de combustible nos ofrecen ventajas mayores a comparación de las baterías y tienen mayores beneficios como:

1. Tienen una mayor eficiencia en el uso de combustibles naturales y ayudan al decremento del uso de hidrocarburos.
2. Es una fuente de energía que no emite sonido a diferencia de las máquinas de combustión lo que las hace más adaptables a lugares difíciles.
3. Produce agua en su estado más puro gracias a las reacciones que se producen en su interior.
4. Minimizan la producción de gases contaminantes a la atmosfera lo que contribuye al decremento de gases de efecto invernadero. (Garcia, 2015)

Celdas de combustible microbianas

Las celdas de combustible convierten energía eléctrica de varios compuestos en energía eléctrica, una celda de combustible microbiana es casi igual a una celda de combustible tradicional. Las celdas de combustible aprovechan el metabolismo de las bacterias como catalizador. La electrosíntesis microbiana es un tema emergente acerca que plantea que las bacterias son capaces de extraer electrones de superficies del cátodo y utilizarlas para una serie de transformaciones electroquímicas (Das, 2018).

Demanda Química de Oxígeno

Muchos contaminantes se pueden oxidar en caliente con dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), lo cual constituye un método analítico habitual para la determinación de materia orgánica en residuos. Se define la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como la cantidad de O_2 químicamente equivalente al $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ consumido en este proceso. Dicha equivalencia queda establecida a partir de las reacciones de reducción-oxidación correspondientes.

La determinación de la DQO se utiliza para la caracterización y regulación de la emisión de desechos industriales. El campo normal de variación de la DQO en este tipo de vertidos oscila típicamente en el intervalo 200-4000 mg de O_2/L . La DQO se utiliza también para estimar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), en residuos que son demasiado tóxicos para la determinación de esta última. La DBO se define a partir del oxígeno consumido por microorganismos para la degradación de la materia orgánica en la muestra. La DQO es, normalmente, más alta que la DBO, aunque la cantidad variará de unas aguas a otras (Universidad Pablo de Olavide, 2004).

Composición básica de una celda de combustible microbiana

Generalmente, una celda de combustible microbiana es mitad sistema biológico, en donde la actividad biológica se lleva a cabo en la cámara anódica, esta puede considerarse como el corazón del sistema debido a que la electricidad liberada por las bacterias, la reducción de la materia orgánica, la formación de la biopelícula y la producción de hidrógeno ocurre en esta cámara.

En las celdas convencionales de dos cámaras, la cámara catódica es considerada como un receptor de electrones y protones, en las de una sola cámara la cámara aireada es considerada como un receptor de electrones. El electrón llega a este compartimento a través de un circuito externo, en donde es reducido por las moléculas receptoras de electrones y completan el ciclo del electrón, el ánodo y el cátodo pueden estar compuestos del mismo material, uno de los principales componentes es el grafito en diferentes presentaciones.

La membrana separadora se encuentra ubicada entre la cámara anódica y la catódica, también permite el paso de protones del compartimento anódico al catódico (Sivasankar, Mysamy, & Omine, 2018).

A partir de inicios de siglo se han comenzado a presentar investigaciones sobre las celdas de combustible microbiana, un ejemplo de esto es el proyecto “A Novel Electrochemically Active and Fe(III)-reducing Bacterium Phylogenetically Related to *Clostridium butyricum* Isolated from a Microbial Fuel Cell” (Park, y otros, 2001) en los cuales se empleó una bacteria anaerobia aislada en una celda de combustible microbiana con agua residual producto del procesamiento de almidón como combustible.

Por otro lado, se encuentra el proyecto “A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*” (Kim, y otros, 2002, págs. 145-152) en donde se

evaluaron dos procesos, la transferencia directa de electrones de diferentes cepas de putrefactantes de *Shewanella* a un electrodo se examinó usando voltametría cíclica y una celda electroquímica de celda de combustible.

Como se mencionó anteriormente, la celda de combustible microbiana utiliza microorganismos activos como biocatalizadores en la cámara anódica anaerobia para generar bioelectricidad. La mayoría de las celdas de combustible microbianas consisten en compartimientos anódicos y catódicos divididas por una membrana de intercambio de protones.

El biocatalizador en el ánodo oxida el sustrato orgánico produciendo electrones y protones, los electrones viajan por un circuito externo hacia la cámara catódica mientras que los protones viajan a la misma a través de la PEM. En dicha cámara los electrones y protones reaccionan junto con la reducción paralela de oxígeno a agua (Rahimnejad, Adhami, Darvari, Zirepour, & Oh, 2015).

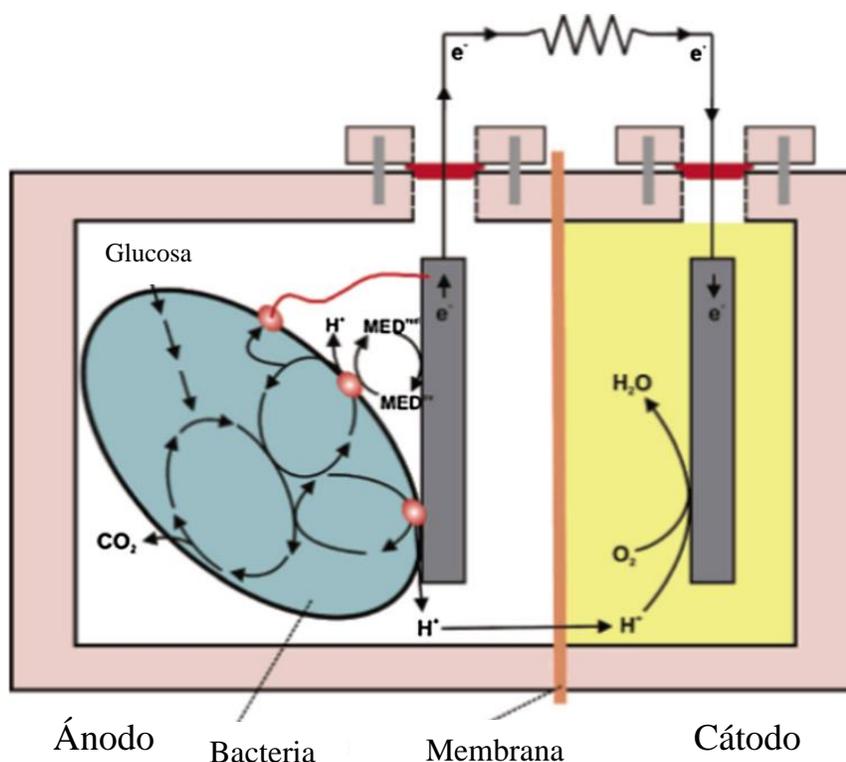
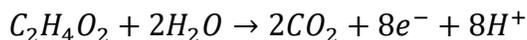
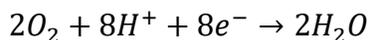


Imagen 7. El sistema de Celda de combustible microbiana formado por los compartimientos de ánodo y cátodo (Rahimnejad et al., 2015)

La reacción producida en la cámara Anódica sería la siguiente:



Mientras que en la cámara Catódica la reacción sería:



Existen diseños previos de Celdas de Combustible Microbianas de flujo, una primera división es por su forma de operar, por lotes, es decir que la celda es alimentada con el sustrato, se deja un cierto tiempo y posterior a esto se extrae, la otra forma de operar es en continuo, es decir que se mantiene permanentemente suministrando la celda, considerando el Tiempo de Retención Hidráulico, y manteniendo una recirculación para mantener una población estable de microorganismos. (Santoró, Arbizzani, Erable, & Ieropoulos, 2017)

Celdas de Combustible Microbianas de Flujo Continuo.

Para este proyecto se van a considerar las CCM de flujo continuo, para este tipo de celdas también existen diferentes diseños, un ejemplo es una CCM de dos cámaras con placas de metacrilato cada cámara con dimensiones de 14 x12 x 2 cm³, separadas por una membrana de intercambio catiónico de 14 x12 cm² Ultrex CMI-7000, con ánodo de grafito granular de 2 a 6 mm de diámetro y tela de carbono de 3.18 mm de espesor, teniendo un volumen neto de ánodo de 165 mL para la CCM alimentada con agua residual sintética. El volumen neto del cátodo fue de 250 mL. (Sotres, Tey, Bonmatí, & Viñas, 2016).

Tabla 2. Parámetros electroquímicos de la CCM alimentada con Agua residual sintética (Sotres et al., 2016)

Periodo (Semanas)	Resistencia interna Ω	Densidad de Potencia (mWm⁻³)	Voltaje de circuito Abierto (mV)
14	1874	34	284
25	698	200	386

28	566	287	396
35	474	367	386
39	570	442	402
41	234	728	502
45	416	652	428
69	256	2138	574

Otro ejemplo es una CCM que funcionaba a partir de agua residual de una cervecería en China como sustrato, con una DQO 626.58 mg / L. La CCM mostró un voltaje de circuito abierto de 0.578 V y una densidad de potencia máxima de 9.52 Wm⁻³. La CCM fue de una sola cámara construida con plexiglás con dimensiones internas de 6 x 5 x 6 cm³ (180 mL de volumen), el volumen neto del reactor fue de 100mL. El ánodo fue hecho con tres grupos paralelos de fibras de carbono, que fueron enrolladas en dos barras de grafito formando una estructura similar a una persiana.(Wen, Wu, Cao, Zhao, & Sun, 2009)

Tabla 3. Degradación de Sustrato a diferentes resistencias externas (Wen et al., 2009)

Resistencia Externa (Ω)	9000	500	100	70	60	20
<i>DQO del Afluente (mg/L)</i>	604	636	652	657	626	654
<i>DQO del Efluente (mg/L)</i>	344	372	387	391	358	380
<i>DQO Removido (mg/L)</i>	260	264	265	266	268	273
<i>Eficiencia de remoción de DQO (%)</i>	43.0	41.5	40.6	40.5	42.8	41.7

Un modelo más presenta una CCM para tratar lixiviados en la cual se empleó un prototipo cilíndrico con dos mamparas colocadas a 1/3 de separación con respecto al diámetro de la cámara, Las mamparas se colocaron con el fin de favorecer la transferencia de sustrato en la celda una vez que la misma se encuentre operando de manera continua con el objetivo de minimizar cortos circuitos entre la entrada y la salida de la celda.

El espacio efectivo fue de las siguientes dimensiones 78 mm de largo, 94 de diámetro y un volumen de operación de 150 mL. El área superficial del ánodo por unidad de volumen fue de $18.8 \text{ m}^2/\text{m}^3$, en los extremos se colocaron el anión y el catión en donde los electrodos estuvieron constituidos por una lámina de acero, adicional a esto el cátodo contaba con la una Membrana de Intercambio Protónico y ambos con una tela de carbón Toray (Carmona, 2008).



Imagen 8. Configuración de la Celda de Combustible Microbiana (Carmona, 2008)

Un prototipo similar es una CCM con baffles o mamparas y con un ánodo en forma de escobillón, con las siguientes dimensiones, 9 cm de largo, 6 cm de ancho y 6 cm de alto, con placas de acrílico de 0.5 cm de espesor, las mamparas fueron de 5 cm de largo por 4.5 de ancho y fueron colocadas a 1 cm de la entrada y de la salida respectivamente. El escobillón fue colocado en la parte central de la cámara anódica (Cervantes, 2011).

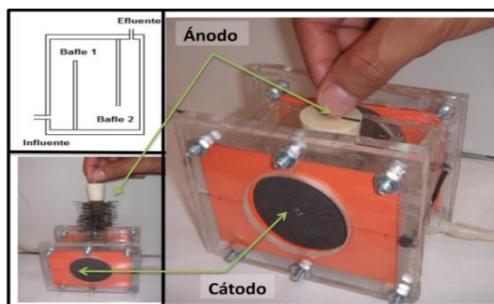
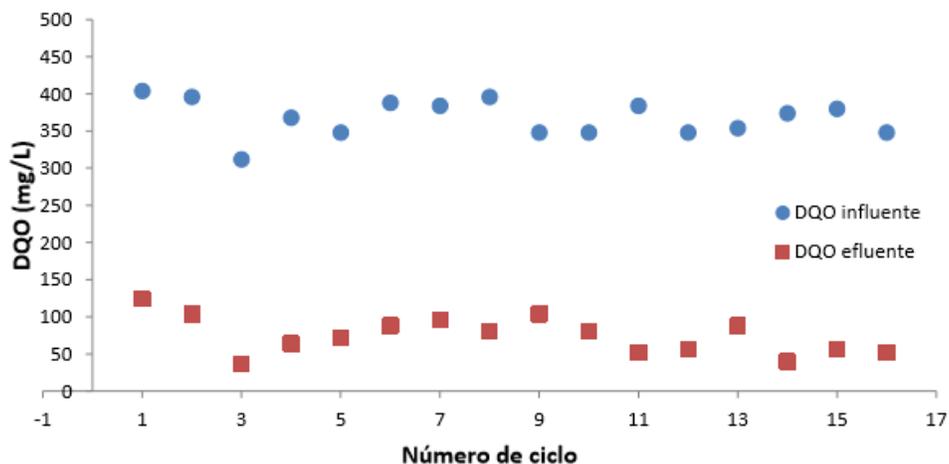


Imagen 9. Celda de combustible microbiana de una sola cámara con baffles y con el ánodo en forma de escobillón (Cervantes, 2011)



Gráfica 1. Comportamiento de la DQO del influente y del efluente durante los 16 ciclos de operación de la CCM con baffles (Cervantes, 2011)

Por último, un diseño interesante es una celda de combustible fotosintética que cuenta con dos cámaras, de 800 mL de volumen útil, empujando una Membrana de Intercambio Protónico Sterion®, Los Electrodo en ambas cámaras fueron de tela de carbón con 10% de teflón con una superficie activa de 8 cm² cada uno, durante la operación el ánodo y el cátodo fueron conectados con una resistencia de 120 Ω. (González del Campo, 2015)

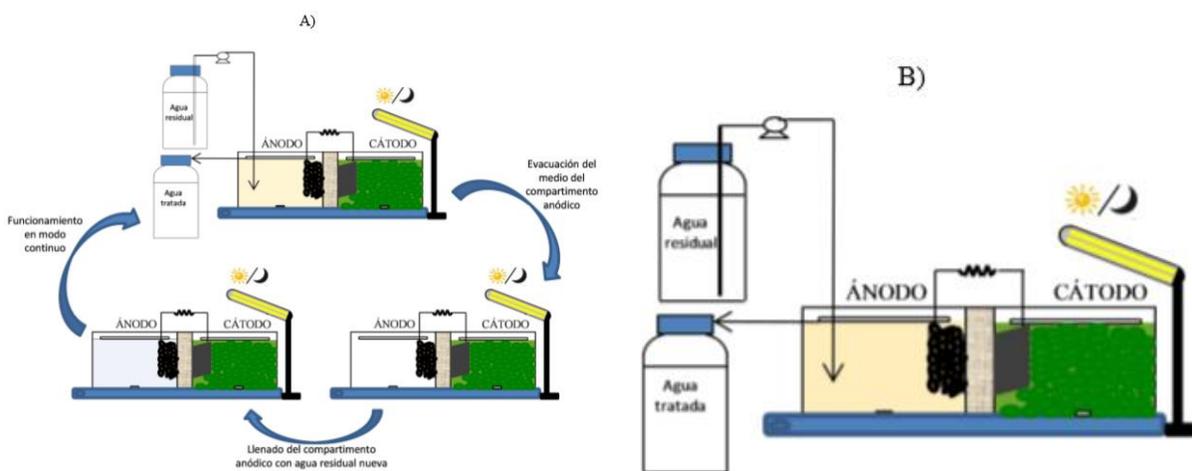


Imagen 10. Procedimiento Experimental del estudio de influencia de los microorganismos en suspensión. A) Operación para evitar el crecimiento de microorganismos en suspensión. B) Operación que permitió el crecimiento de microorganismos en suspensión (González del Campo, 2015)

Celda de Combustible Microbiana tipo Humedal.

Hace 350 millones de años cuando los ambientes pantanosos predominaban, los humedales conservaron gran cantidad de combustibles fósiles. Desde 1912 hay estudios acerca de los humedales, en la década de los cincuenta se iniciaron los estudios para su construcción en el Instituto Max Planck en Alemania-USA, en los noventa se empezó a incrementar el número de humedales construidos ya que el diseño era para agua residual municipal, industrial, pluvial y residuos agrícolas (Chafloque & Gómez, 2012).

Son excavaciones que ocupan grandes extensiones de tierra y tienen profundidades menores a 0.60 m, tienen presencia de agua en periodos muy prolongados que alteran las propiedades del suelo, de microorganismos, flora y fauna. El conjunto de este ecosistema contribuye a disminuir drásticamente a los contaminantes a través de procesos aerobios.

Desempeñan el papel de supermercado biológico debido a la gran diversidad alimentaria y biológica. Son zonas de transición entre el medio terrestre y acuático, tienen una variedad de constituyentes químicos y físicos debido a que por debajo del gradiente de humedad el agua se mueve.

Los Humedales están compuestos de vida microbiana que son importantes para la remoción de materia orgánica. Son sitios de nutrientes que funcionan como amortiguador para contaminantes orgánicos e inorgánicos, son efectivos para el tratamiento de agua residual a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacteria (Chafloque & Gómez, 2012).

Procesos de remoción.

Procesos de remoción físicos. Se remueve materia particulada gracias al sustrato y raíces de la vegetación, la sedimentación de solidos suspendidos auxiliada por el flujo laminar.

Procesos de remoción biológicos. Gracias a la gran cantidad de nutrientes en el agua residual, las plantas pueden asimilar dichos nutrientes como nitrato, amonio y fosfato, aunque inclusive varias especies de plantas también pueden acumular metales pesados. Microorganismos y bacterias aportan, asimilan y almacenan muchos de estos nutrientes a corto plazo e inclusive son parte de la descomposición del tejido de la planta muerta conocida como detritus.

Proceso de remoción Químico. La absorción es el proceso químico más importante en un humedal ya que es la transferencia de iones (moléculas con carga positiva y negativa, la adsorción que es la unión de iones al suelo y hace posible la precipitación también es de gran importancia. Gracias a estas propiedades y al intercambio catiónico, el suelo puede retener contaminantes con carga catiónica y esto será favorecido entre mayor sea la concentración de arcilla y materia orgánica (Chafloque & Gómez, 2012).

Celda de combustible microbiana implementado en humedal

CCM abastecidos por un Humedal. Un ejemplo de diseño es el diseño de 5 celdas con diferentes tamaños que se alimentaron de sedimento de un Humedal, clasificados según el volumen utilizado.

Descripción de las celdas

Tabla 4. Tipos de celdas (Victoria Falco, 2016)

<i>Celda 1</i>	<i>Celda de sedimento de Juanico, realizada en tubo falcon de 50 ml, con 40 ml de sedimento y ánodo de 6,8 cm x 2,6 cm. Celda de circuito cerrado</i>
<i>Celda 2</i>	Celda de sedimento de Juanico, realizada en tubo falcon de 50 ml, con 40 ml de sedimento y ánodo de 6,8 cm x 2,6 cm. Celda de circuito cerrado

<i>Celda 3</i>	Celda de sedimento de Juanico, realizada en tubo falcon de 50 ml, con 40 ml de sedimento y ánodo de 6,8 cm x 2,6 cm. Celda de circuito abierto (control).
<i>Celda 4</i>	Celda de sedimento de Juanico, realizada en matraz de 1L, con 200 ml de sedimento. Celda de circuito abierto (control).
<i>Celda 5</i>	Celda de sedimento de Juanico, realizada en matraz de 1L, con 200 ml de sedimento. Celda de circuito cerrado.

En ese estudio se tomó la medición del voltaje que producían por un periodo de 120 días, los resultados obtenidos variaron en cada tipo de celda. Los circuitos de las celdas 1 y 2 se cerraron a los 20 días de operación, estas presentaron voltajes de 0.02 y 0.015 V. El circuito abierto de la celda 3 mostró potenciales de 0.6 a 0.8 V, sin embargo, a partir del día 65 decae. Las celdas 4 y 5 mostraron un periodo de estabilización de 60 días con un potencial de 0.8 V el cual se mantuvo constante. (Victoria Falco, 2016)

Humedal para remoción de metales. Otro diseño es donde se utilizó un humedal para la remoción de metales, se utilizaron cilindros de polivinilo de 34 cm de altura y 20 cm de diámetro. El sustrato lleno de roca volcánica (tezontle), con un volumen de 4.06 L. La especie vegetal utilizada es *Phragmites australis*. Las cepas de bacterias fueron del género *Bacillus* y Gram mantenidas en un medio con temperatura 4°C.

La carga orgánica con metales pesados se depositó en los 8 diseños de humedales que se diferenciaron por ser inoculados y no inoculados, variando el contenido de metales. Los resultados de dicho diseño mostraron que el metal que se retuvo no afectó letalmente a la vegetación, aunque sí inhibió el desarrollo de la planta. (Sosa & Leonel, 2015).

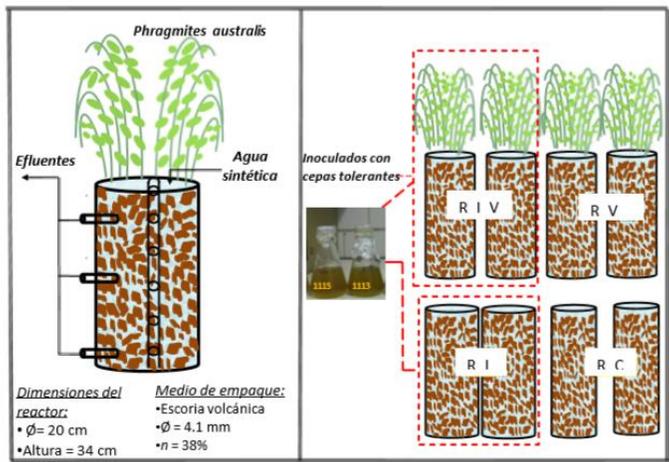
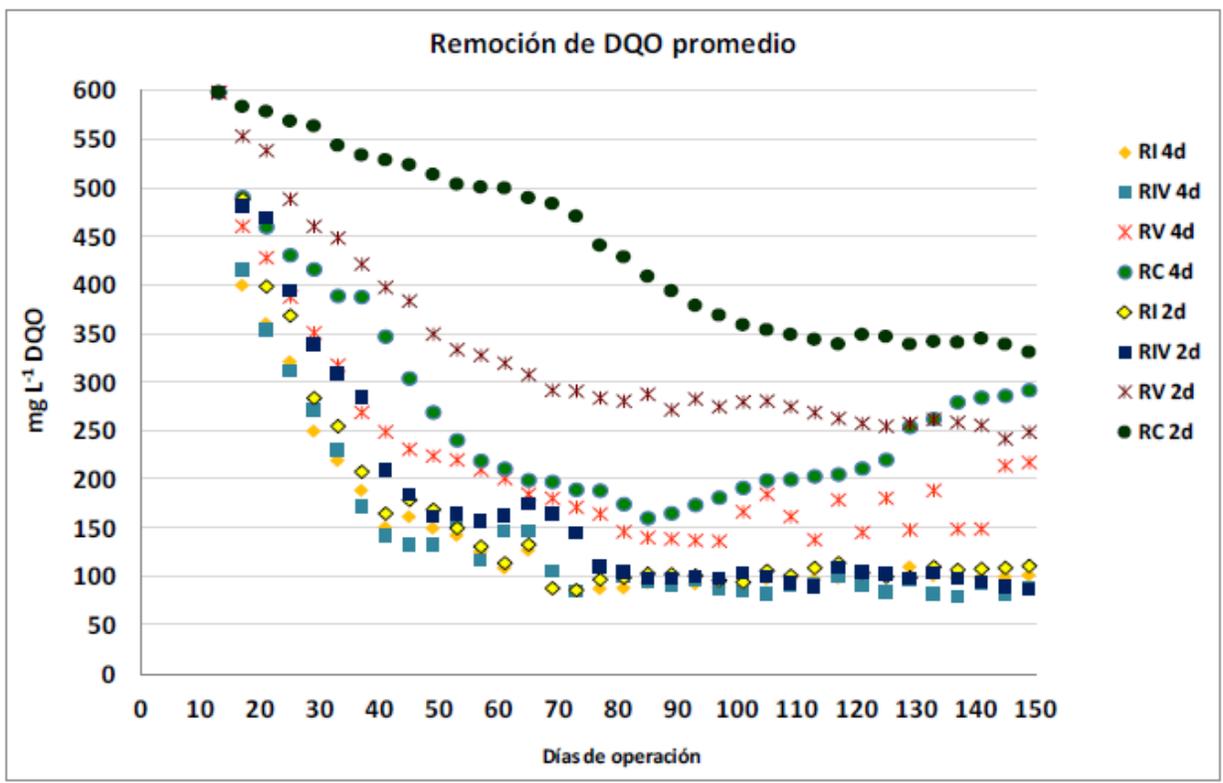


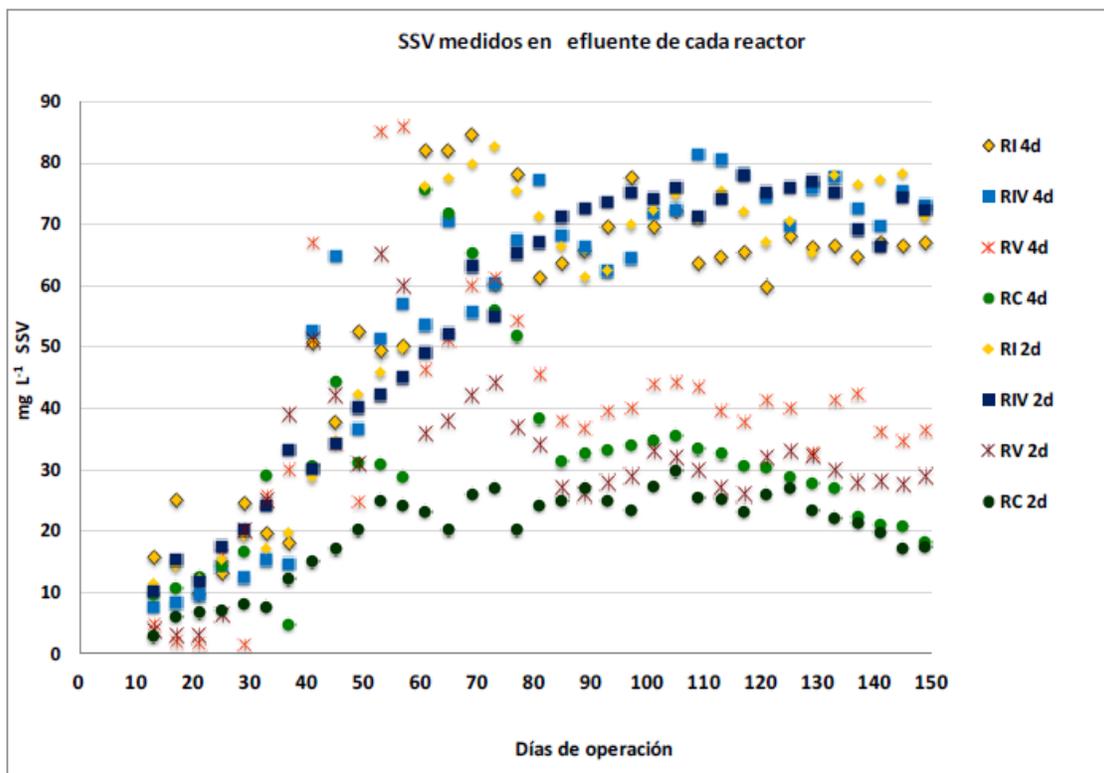
Imagen 11. Tipos de humedales y su conformación (Sosa & Leonel, 2015)

Se examino la remoción de materia orgánica expresada como DQO para cada tipo de humedal.



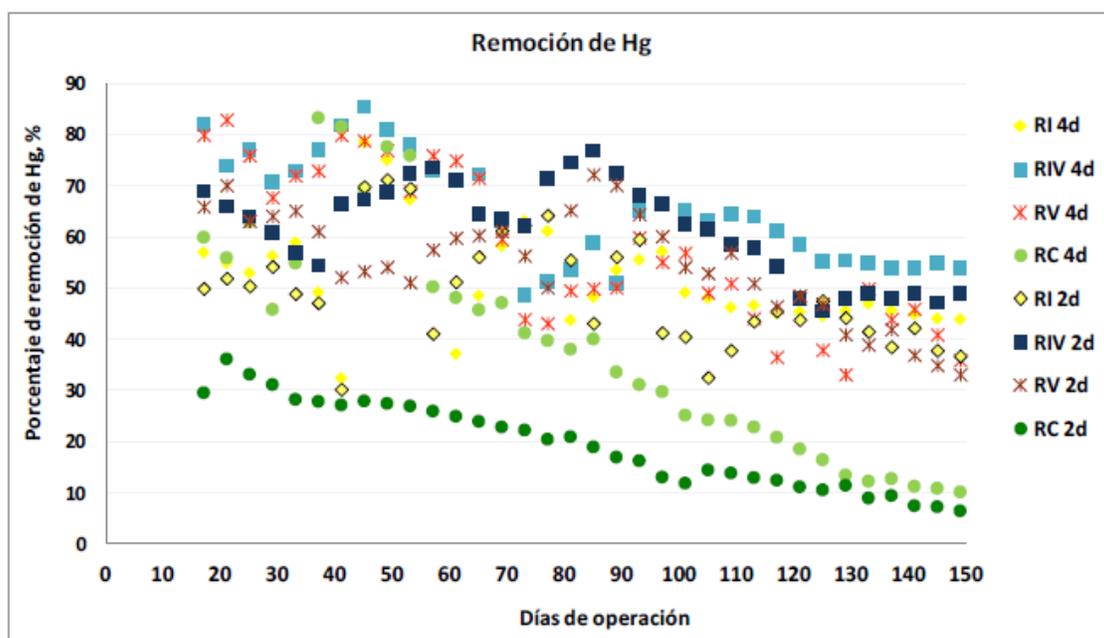
Gráfica 2. Remoción de la materia expresada como DQO con TRH de 2 y 4 días (Sosa & Leonel, 2015)

También la cantidad de Sólidos Suspendedos Volátiles en el efluente



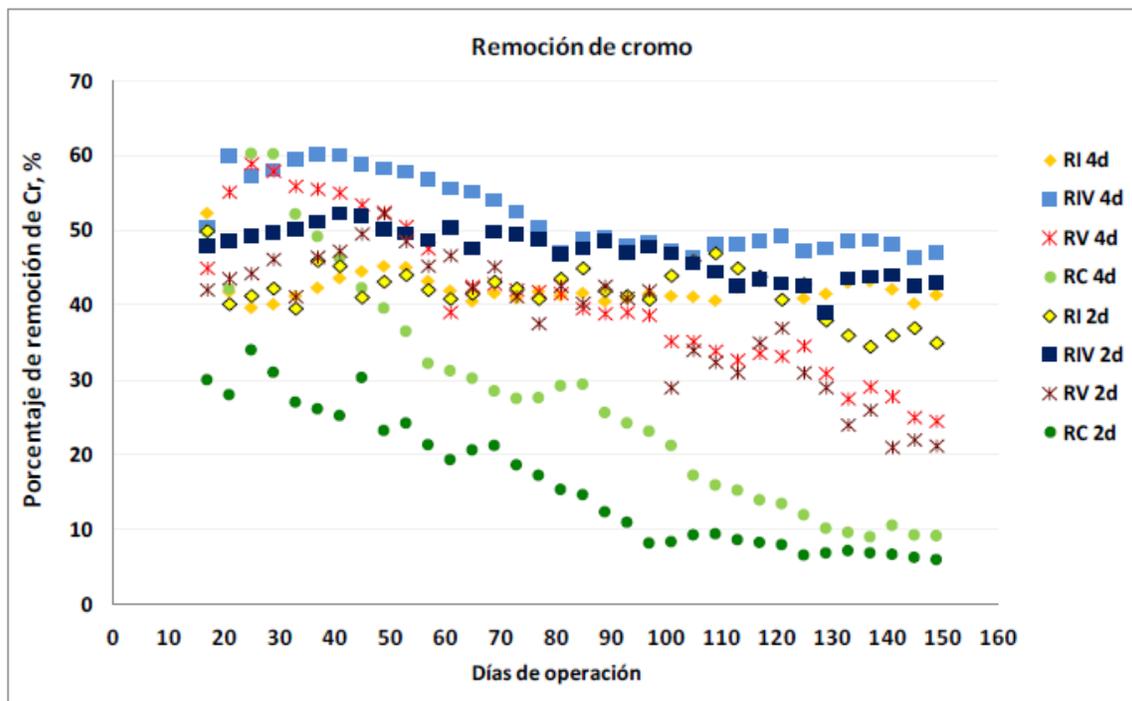
Gráfica 3. Concentración de SSV con TRH de 2 y 4 días (Sosa & Leonel, 2015)

La cantidad de mercurio removido



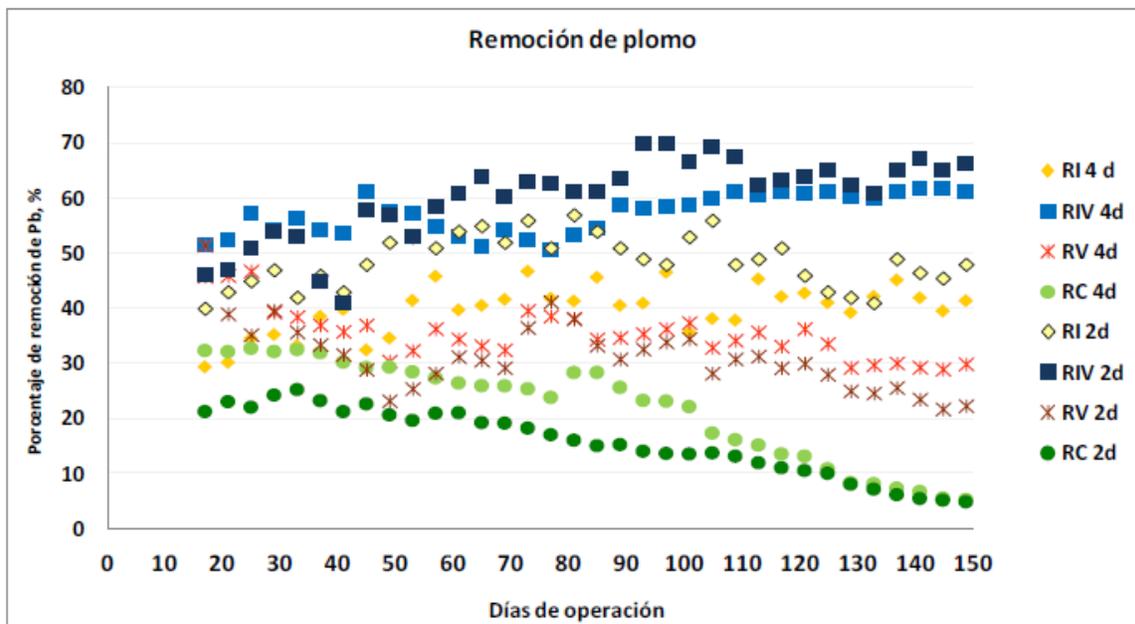
Gráfica 4. Remoción promedio de mercurio (Sosa & Leonel, 2015)

La cantidad de cromo removido



Gráfica 5. Remoción promedio de cromo (Sosa & Leonel, 2015)

Y la cantidad de plomo



Gráfica 6. Remoción promedio de plomo (Sosa & Leonel, 2015)

Capítulo II. Propuestas de diseño de Celdas de combustible microbianas

A partir de los diseños previos se propuso el de una Celda de Combustible Microbiana de Flujo continuo, considerando los materiales a emplear, dimensiones y el caudal.

De las referencias anteriores el diseño de la Celda de Combustible Microbiana de flujo Continuo en el que se basa principalmente es en de *Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂*.

Mientras que para la Celda de Combustible Microbiana tipo Humedal se basó principalmente en el modelo en la tesina “Aplicación de sistemas bio-electroquímicos en humedales construidos para la obtención de energía renovable durante el tratamiento de aguas residuales (711-TES-CA-5888)” ya que gracias a sus diferentes prototipos se optó por la de mejor eficiencia con un volumen total de 0.0216 m³, las dimensiones del humedal fueron de 21.8 x 27.1 x 40 cm³.

La diferencia fue que el humedal diseñado en lugar de ser un cilindro es un prisma rectangular ya que el proceso constructivo presentará menos dificultades, el área de contacto entre electrodos será mayor y la planta tendrá más espacio para que las raíces crezcan sin ser tan limitadas. La membrana es de fibra de vidrio por sus propiedades aislantes con un espesor de 4 cm y en su interior se esconde una capa de carbón activado con 1 cm de espesor. (Martínez Crespo, 2015).

Una vez determinado este se realizó el render de las Celdas en AutoCAD 3D para obtener así las medidas exactas considerando el espesor del acrílico que se iba a emplear, así como la

distribución de las mamparas y las placas de sujeción para el caso de la Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo.

A la par se diseñó el depósito general en donde se introduciría el agua residual para cada sistema, considerando el tipo de salida requerida para cada sistema, la cual permitiera regular el caudal para mantener el tiempo de retención hidráulico como se requiriera en la que en ambos casos se emplearon mangueras de venoclisis.

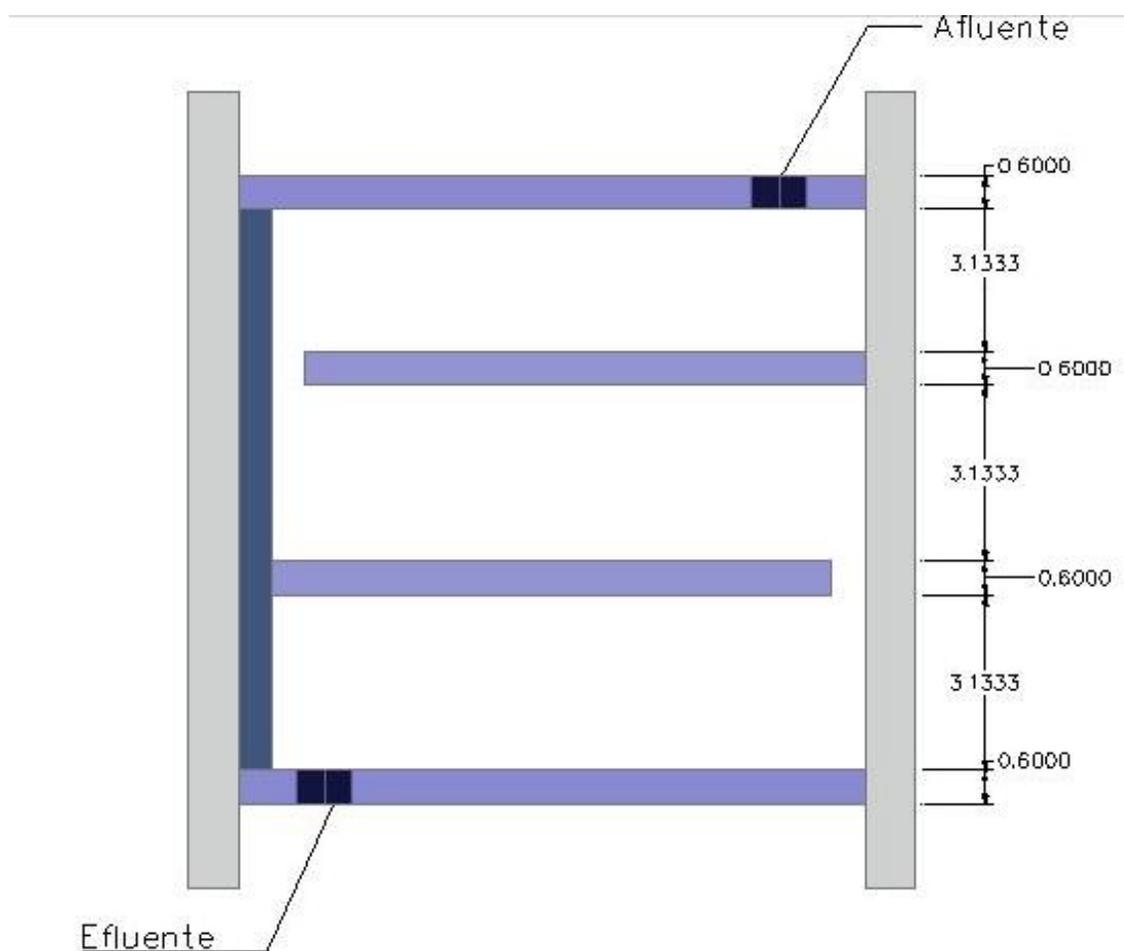


Imagen 12. Vista lateral y acomodo de mamparas de modelo de Celda de combustible Microbiana de Flujo Continuo.

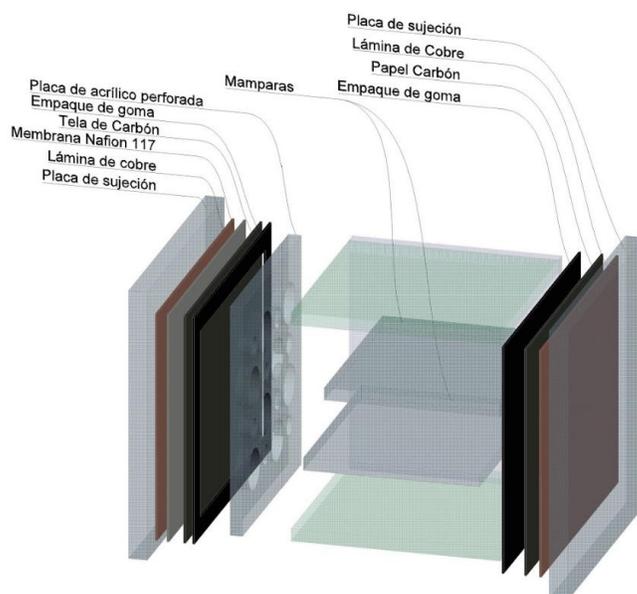


Imagen 13. Perspectiva de Celda microbiana de flujo Continuo con sus componentes

Por último, se realizó un render del conjunto de las celdas, así como el depósito, diseñando un mueble que nos permitiese que el sistema funcione por gravedad sin necesidad de un sistema externo de bombeo. Una vez obtenidas las medidas se realizó un dibujo lineal en CorelDRAW distribuyendo las figuras en tableros de 60cm x 30cm puesto que este es el tamaño máximo de la cortadora láser.

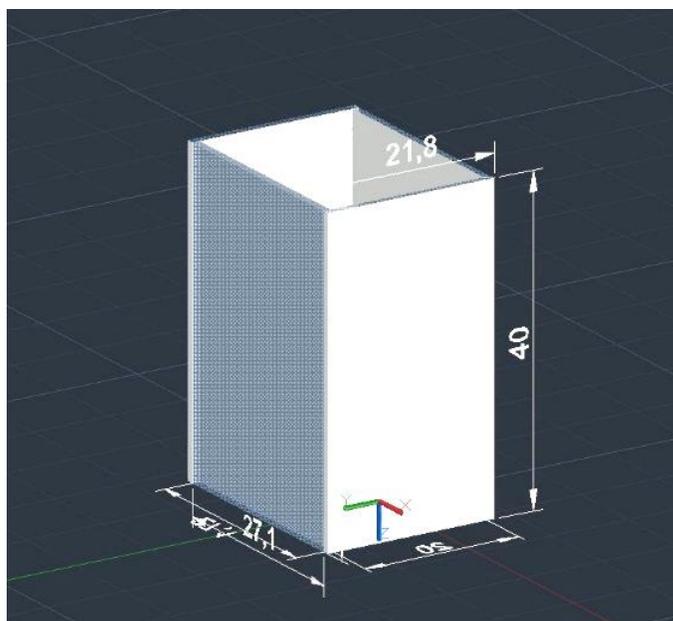


Imagen 14. Modelo del tanque del Humedal 3D realizado en AutoCAD

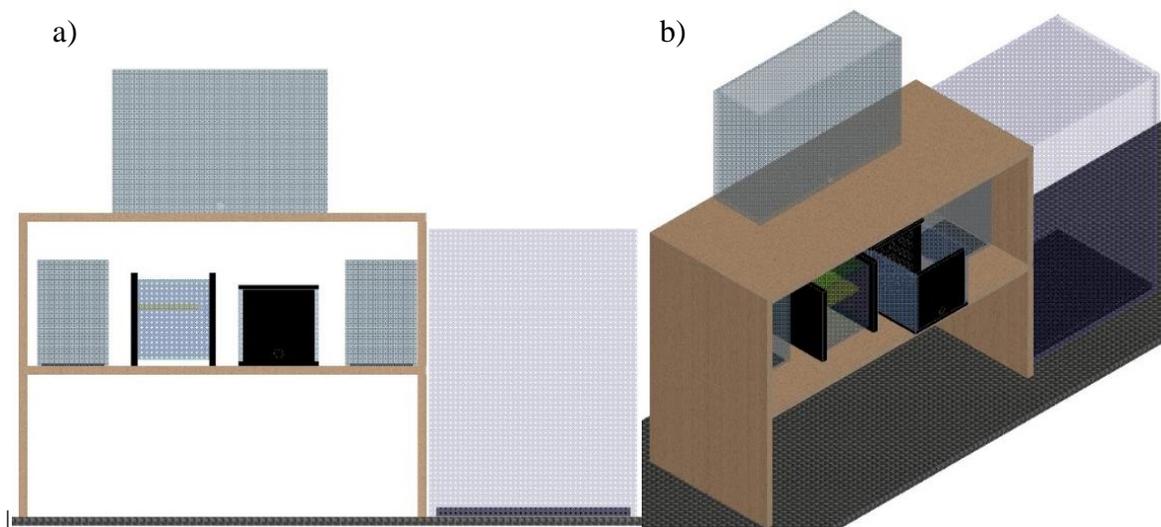


Imagen 15. a) Vista frontal de render del conjunto de celdas. b) Vista Isométrica de render de celdas de combustible.

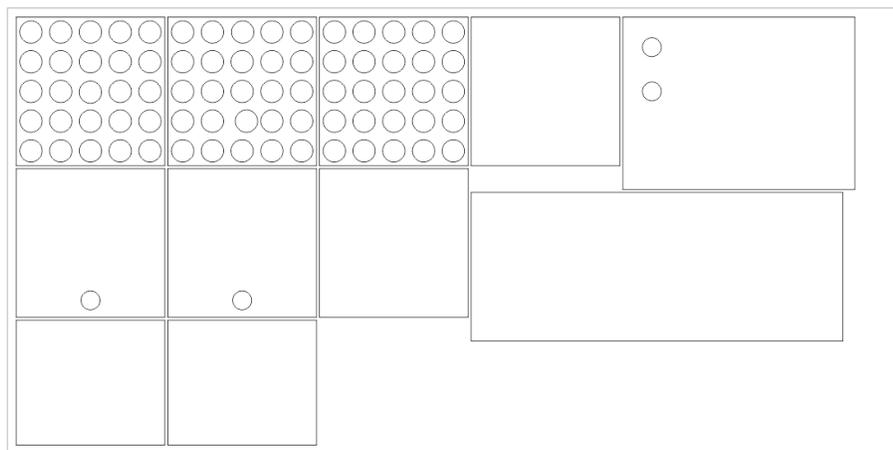


Imagen 16. Ejemplo de plano 2D hecho en CorelDRAW para llevar a la cortadora láser

Capítulo III. Proceso constructivo de Celdas de Combustible Microbianas

Cortes y ensamble de celdas de combustible microbianas y dispositivos auxiliares

Para los cortes en acrílico se contó con el apoyo del laboratorio de computo de Diseño Industrial de la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la U.N.A.M, los cortes se realizaron en una Cortadora Laser VERSA LASER VLS2.30 las dimensiones máximas de los tableros son de 30 cm x 60 cm por lo que previo a el corte laser se requirió hacer dichos tableros con una sierra caladora.

Los cortes se hicieron en varias sesiones ya que, por la complejidad del corte, el número de cortes originados a figuras en el acrílico y la cantidad de tableros la eficiencia de la cortadora se vio disminuida por lo que se requirió de más tiempo.



Fotografía 7. Corte de acrílico a láser en Cortadora Laser VERSA LASER VLS2.30

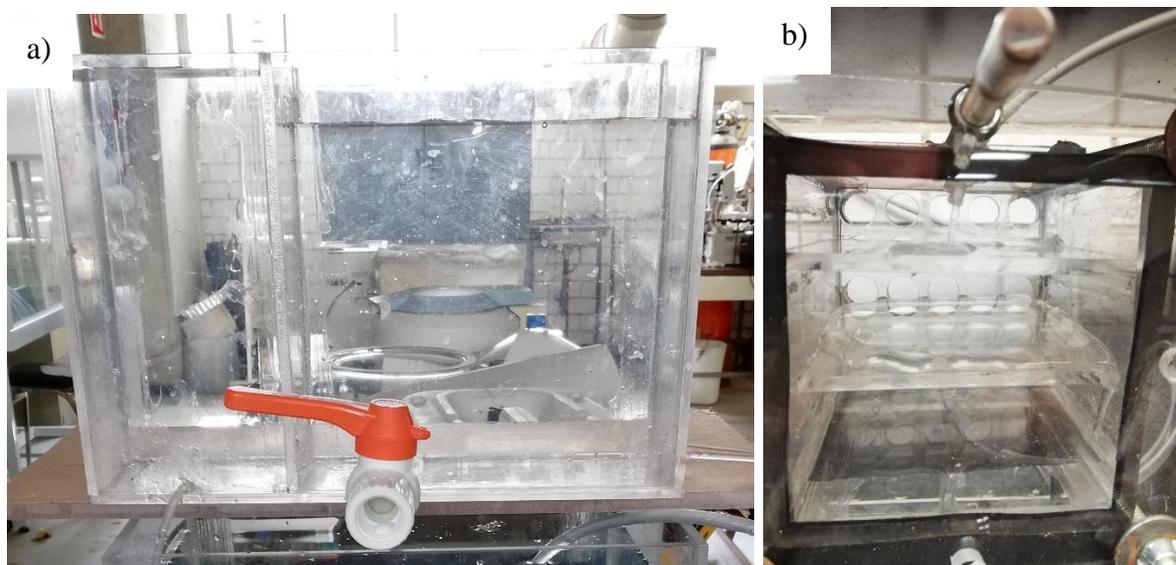
Una vez obtenidas las piezas de acrílico se procedió a el ensamble de la celda de combustible microbiano de flujo continuo, del humedal, así como del depósito de afluente y el del efluente.

Esto se realizó primero preparando una mezcla de 30% AD-CRYL y 70% de Cloruro de Metileno. Posteriormente, se fijaron con nodulares las piezas de menor tamaño y se añadió dicha mezcla dejando soldar el acrílico por un día, para el caso de las de mayor dimensión como son las del humedal y la del tanque de afluente se realizó con la ayuda de ángulos de aluminio sujetados con espárragos, de igual forma se dio un tiempo de reposo de un día para permitir la soldadura entre los elementos.



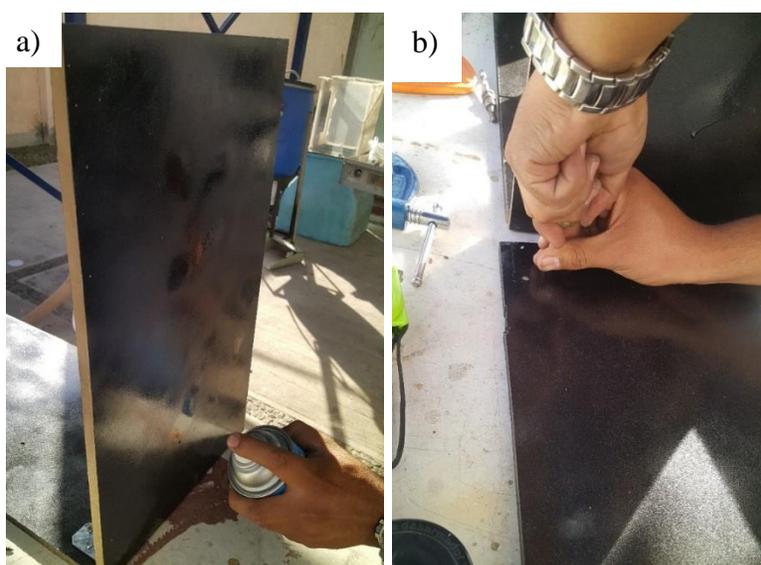
Fotografía 8. Ensamble de depósitos de efluente

Una vez armados todos los tanques se realizaron pruebas de impermeabilidad en cada uno de los elementos con el fin de evitar posibles fugas en estos, en el caso de ser detectada alguna se procedía a colocar nuevamente la mezcla para la unión de acrílico y por último, se colocó silicón en todas las uniones para asegurar la impermeabilidad.



Fotografía 9. a) Prueba de impermeabilidad del Depósito general. b) Prueba de impermeabilidad de la ceda de combustible microbiana de flujo continuo antes de ser ensamblada con sus componentes.

Para el mueble de madera partir de las medidas en el render se propusieron las medidas y se realizaron los cortes 2 placas de 30 cm x 50 cm para los laterales y 2 placas de 30 cm x 60 cm para los entrepaños del mismo, el material empleado fue madera MDF de 12mm de espesor, posteriormente se realizaron los cortes se pintaron dichas piezas y por último se ensambló el mueble con las dimensiones requeridas, dentro de las placas se colocaron perforaciones para colocar las mangueras de venoclisis y evitar que estas se movieran.



Fotografía 10. a) Pintura de mueble de madera b) Ensamble de mueble de madera

Diseño de electrodos

Para el caso del Humedal en cada cámara se colocó un electrodo, el ánodo en la cámara anaerobia y el cátodo en la cámara aerobia. Para el material utilizamos placas de cobre electrolítico de 15x20 cm ya que el área de contacto por ser un rectángulo será mayor y podrá captar una mayor cantidad de electrones.

Se seleccionó con base en los estudios de diferentes materiales utilizados como electrodos en el trabajo de tesis “Implementación de una Celda de Combustible Microbiano a partir de agua residual doméstica” por lo que las placas de cobre logran la mayor eficiencia (Racines Guzman & Santander Boccio, 2016).

El cable de cobre calibre 12 se conectó con ayuda de soldadura de estaño 60/40 y cautín, seguido de esto se introdujo el cable en los orificios del humedal. En el caso de la Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo el procedimiento fue el mismo salvo que las dimensiones variaron a placas de 11.2 x 11.2 cm dejando en una esquina de cada placa una pestaña para la unión entre la placa de cobre y el cable.



Fotografía 11. Unión de placa y cable con soldadura de estaño

Ensamble de Celda de Combustible Microbiano de Flujo Continuo

Previo a el ensamble se cortaron los espárragos con los que se iba a atornillar la celda, se cortaron y perforaron las placas de sujeción, se cortaron y soldaron los electrodos de cobre, se cortó el papel carbón con dimensiones de 10 cm x 10 cm, a su vez también se cortaron 2 empaques hechos reciclando cámara de llanta y por último se cortó la membrana Nafion® 117 de 10 cm x 10 cm y se realizó la activación, el procedimiento realizado es el siguiente:

1. Inmersión de la membrana por una hora en H_2O_2 al 30% en volumen a 80°C
2. Inmersión de la membrana por una hora en H_2O desionizada a 80°C
3. Inmersión de la membrana por una hora en H_2SO_4 0.5 a 80°C
4. Inmersión de la membrana por una hora en H_2O desionizada a 80°C



Fotografía 12. Corte de empaques para Celda de Combustible Microbiana de flujo continuo

Una vez obtenidas todas estas piezas se ensamblaron los componentes de la membrana, fijando primero el cátodo, el orden del acomodo fue: empaque, papel carbón, electrodo de cobre y placa de sujeción, en ese orden. Mientras que en el Ánodo el orden fue: empaque, membrana Nafion® 117, tela de carbón, electrodo de cobre y por último, la placa de sujeción; todo esto posteriormente atornillado.

Una vez ensamblado con todos sus elementos nuevamente se realizaron pruebas con agua para localizar fugas, una vez localizadas, se cubrieron con silicón y se procedió al montaje en el mueble para su puesta en marcha reemplazando él agua por agua residual obtenida los lodos activados de una planta de tratamiento.

Ensamble de celda de combustible microbiano tipo humedal

Una vez ensamblado el humedal al igual que la otra celda se le realizaron pruebas de hermeticidad, primero al tanque por si solo y posteriormente se realizaron con los componentes del mismo ya que estos podían generar una mayor presión y a su vez para la salida de los cables de los electrodos se habían realizado dos perforaciones a un costado del humedal, por los cuales se debía verificar que no hubiese fuga.

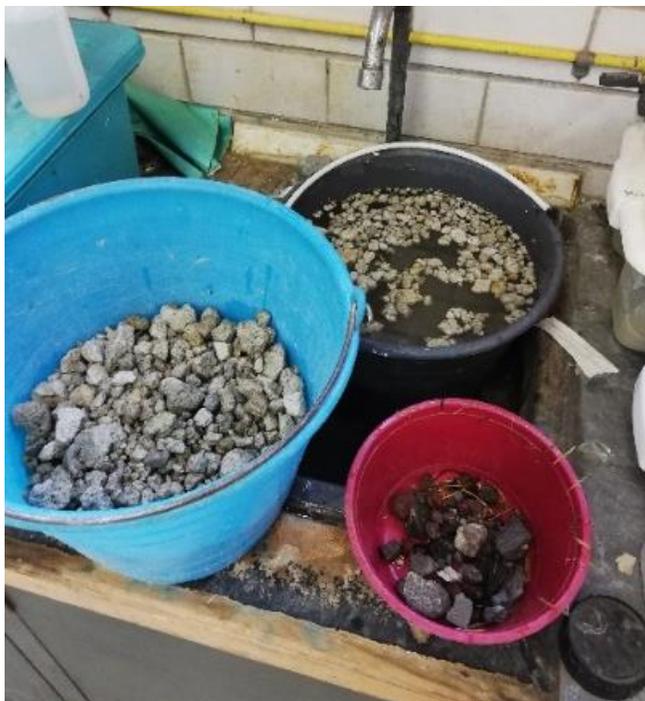


Fotografía 13. Saturación de base humedal

Selección del sustrato

La roca que se utilizó como sustrato para que las bacterias se establezcan es Tepojal, es un material pétreo muy poroso derivado de la espuma volcánica que tiene un buen drenaje en suelos. Por este medio el agua con carga orgánica viajara de forma ascendente permitiendo la retención de materia orgánica.

La selección fue por tamaños ya que la estructura del humedal va por orden granulométrico, desde las rocas más grandes hasta las más finas, apoyándonos de varios tamices que facilitaron el proceso de cribado. El material pétreo paso por un lavado el cual elimino la mayoría de material contaminante.



Fotografía 14. Selección y lavado de sustrato (Tepojal)

Placa de fibra de vidrio

Se utilizó fibra de vidrio ya que es un material aislante que sirve como membrana, su forma es similar a la del algodón, por lo que se hizo una placa, de 2 cm de espesor. Para el manejo del

material se usó equipo de seguridad como guantes y cubrebocas ya que es un material extremadamente fino y liviano que puede ser peligroso.



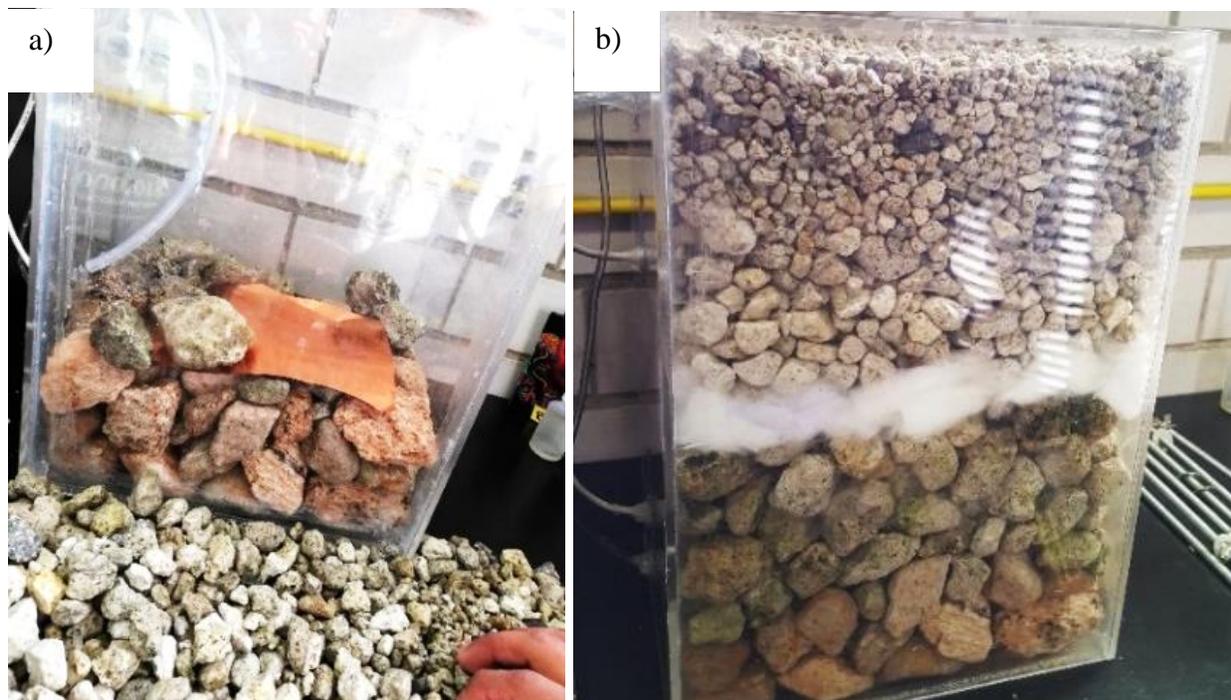
Fotografía 15. Membrana de fibra de vidrio colocada en el Humedal.

Armado de humedal

Se colocó el sustrato en orden granulométrico ascendente (las partículas de mayor dimensión al fondo y las de menor en la superficie), esto para captar materia orgánica de mayor tamaño en el fondo y conforme ascienda el flujo, menor será el espacio entre rocas.

A 5 cm del fondo se conectó el afluente a través de una manguera, a 5cm de la superficie se conectó el efluente. A 10 cm de la base se colocó el ánodo, a 20 cm de la base la membrana de fibra de vidrio, a 30 cm de la base el cátodo.

La planta empleada fue “Cuna de Moisés” de nombre científico *Spathiphyllum* ya que se ajusta a las necesidades del humedal. Crece con poca luz, temperatura tropical, sobrevive en presencia de abundante agua, la raíz no llega a tener gran altura. (Judd, 2013)



Fotografía 16. a) Llenado de humedal con sustrato colocando el ánodo. b) . Sustrato en orden granulométrico con electrodos y membrana colocada

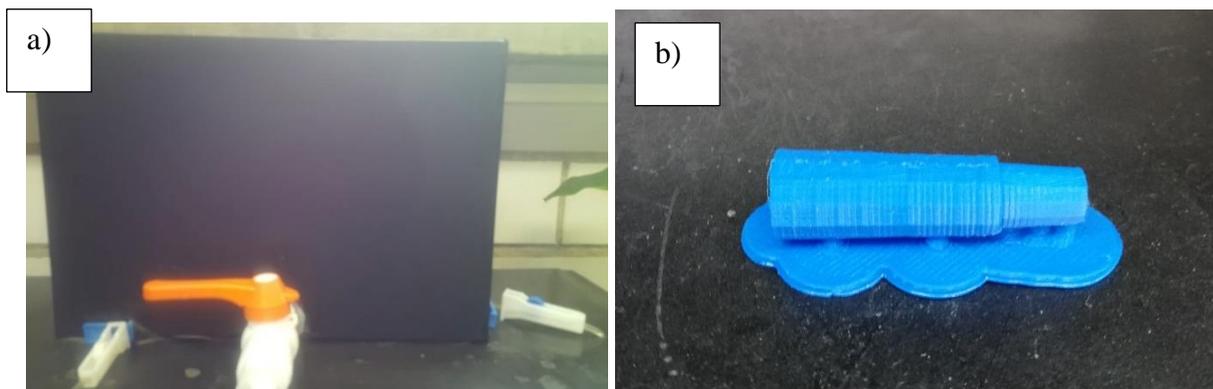


Fotografía 17. Planta colocada en el Humedal.

Puesta en marcha de las Celdas

Una vez concluido el ensamble y las pruebas para determinar que no existan fugas se procedió a el acomodo de las celdas en su mueble conforme a lo planteado en el render, posterior a esto se llenó la celda con agua residual y se llenó un litro adicional el depósito del afluente para mantener el caudal esperado de un litro por día.

Al concluir estas tareas se realizaron unas modificaciones para mejorar el funcionamiento de la celda, dichas modificaciones fueron modelar un tapón para el depósito del efluente en 3D para posteriormente ser impreso en el laboratorio de computo del Centro Tecnológico Aragón y también se forró el depósito del afluente con vinil para evitar la formación de algas debido a que recibía la luz del sol.



Fotografía 18. a) Depósito de Afluente cubierto con vinil. b) Tapón Impreso en 3D



Fotografía 19. Conjunto de Celdas de combustible Microbianas en Operación

Capítulo IV. Resultados y Conclusiones

Resultados

Una vez terminada la construcción de los modelos se comenzaron a operar, primero con agua residual obtenida de la planta de tratamiento ubicada en el Bosque de Aragón, esto con el fin de desarrollar una población de bacterias dentro de los modelos, se llenaron por completo y se dejaron bajo estas condiciones por 14 días para propiciar el desarrollo de las bacterias anaerobias.

Posterior a esto, se mantuvo operando el siguiente mes como un sistema por lotes, es decir, que cada día se le suministraba un litro de agua y se desalojaba la del día anterior, durante este período se midió el voltaje de ambas celdas. El voltaje obtenido en la Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo fue de **960 mV**, mientras que la de tipo Humedal en la primera semana no reportó voltaje, por lo que se le realizó una modificación añadiendo carbón activado por encima y por debajo de la membrana de fibra de carbono, además, de que se aumentó la distancia entre electrodos, posterior a esta modificación la celda reportó un voltaje máximo de **140 mV**.

Al término de este período, se optó por operar como un sistema de flujo continuo ambas celdas, esto trajo como consecuencia que las mangueras del afluente se bloquearan debido a las partículas de sólidos presentes en el agua residual y a que la velocidad del agua no era suficiente para el arrastre de dichas partículas.

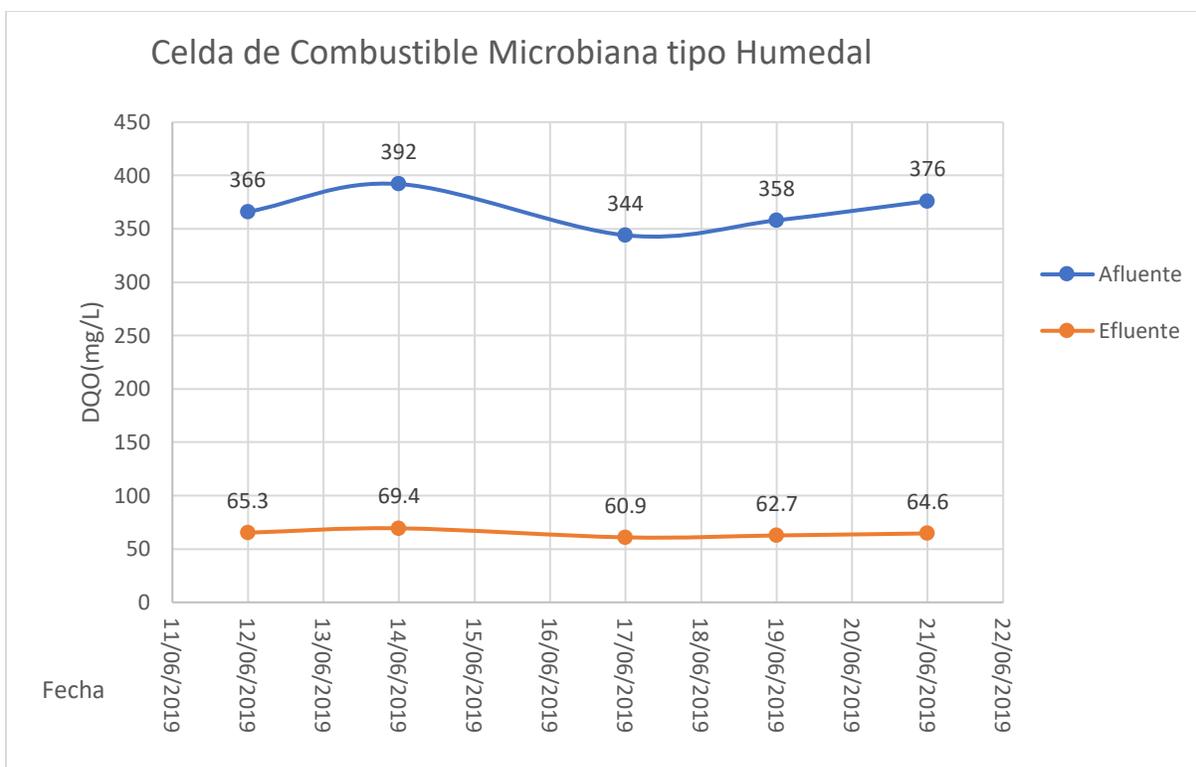
Al no poder modificar la velocidad, pues ésta determina el tiempo de retención hidráulico, se optó por cambiar el agua residual por un agua residual sintética hecha con leche en polvo mezclada con agua, de esta manera se tendrán los nutrientes necesarios para el desarrollo de las bacterias necesarias para el funcionamiento de los modelos.

Una vez hecho este cambio se comenzó con un proceso de estabilización nuevamente, por lo que se dejaron operando las celdas por 14 días en un sistema por lotes, esto con el fin de remover los sólidos restantes dentro del depósito de afluente, así como de las mangueras.

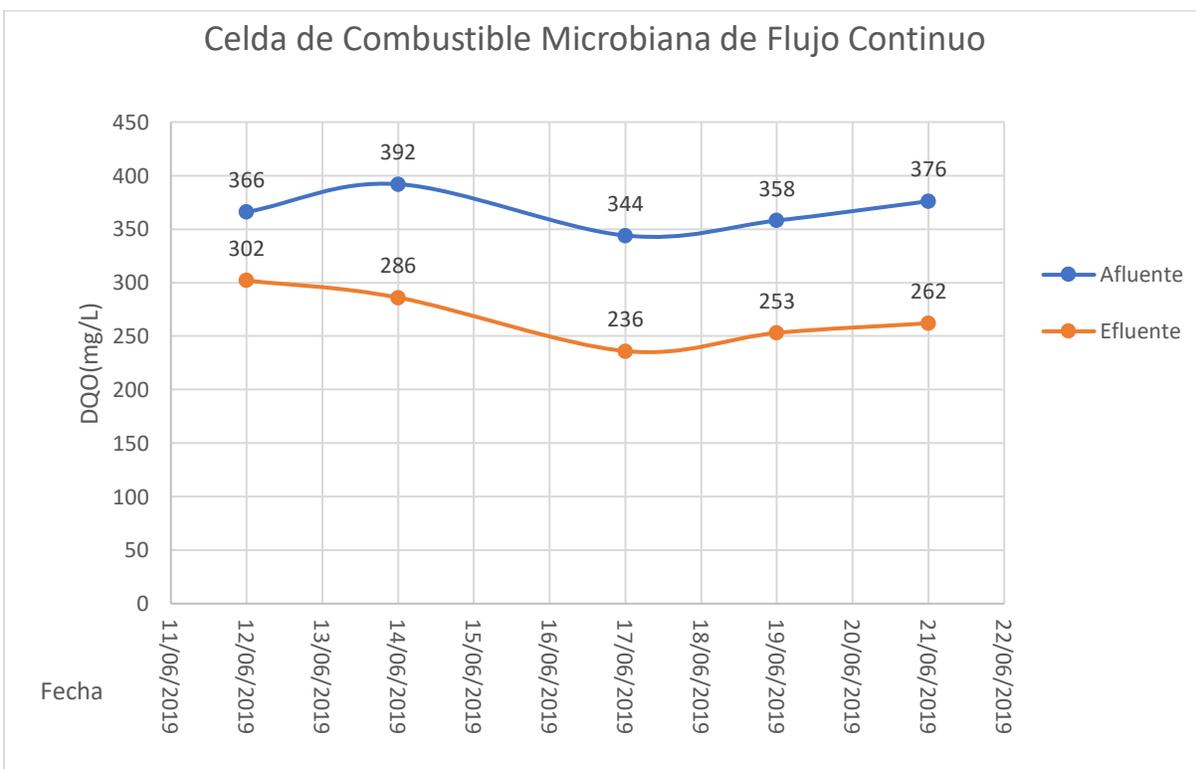
Al concluir este período se comenzó a operar a flujo continuo, teniendo un tiempo de retención hidráulico de un día, obteniendo los datos que se muestran a continuación:

<i>Fecha</i>	DQO (mg/L)	mV	Observaciones
11/06/2019	2086	-	Debido a que se encontró en un periodo sin alimento, se le añadió una dosis de concentración alta como punto de partida
12/06/2019	366		DQO del Afluente
12/06/2019		180	Celda de Combustible tipo Humedal
12/06/2019		60	Celda de Combustible de flujo continuo
14/06/2019	392		DQO del Afluente
14/06/2019	65.3	230	Celda de Combustible tipo Humedal, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 12 de junio de 2019
14/06/2019	302	130	Celda de Combustible de flujo continuo, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 12 de junio de 2019
17/06/2019	344		DQO del Afluente
17/06/2019	69.4	270	Celda de Combustible tipo Humedal, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 14 de junio de 2019
17/06/2019	286	250	Celda de Combustible de flujo continuo, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 14 de junio de 2019
19/06/2019	358		DQO del Afluente
19/06/2019	60.9	310	Celda de Combustible tipo Humedal, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 17 de junio de 2019
19/06/2019	236	370	Celda de Combustible de flujo continuo, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 17 de junio de 2019
21/06/2019	376		DQO del Afluente
21/06/2019	62.7	360	Celda de Combustible tipo Humedal, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 19 de junio de 2019
21/06/2019	253	480	Celda de Combustible de flujo continuo, DQO medida en el efluente correspondiente al agua añadida el 19 de junio de 2019

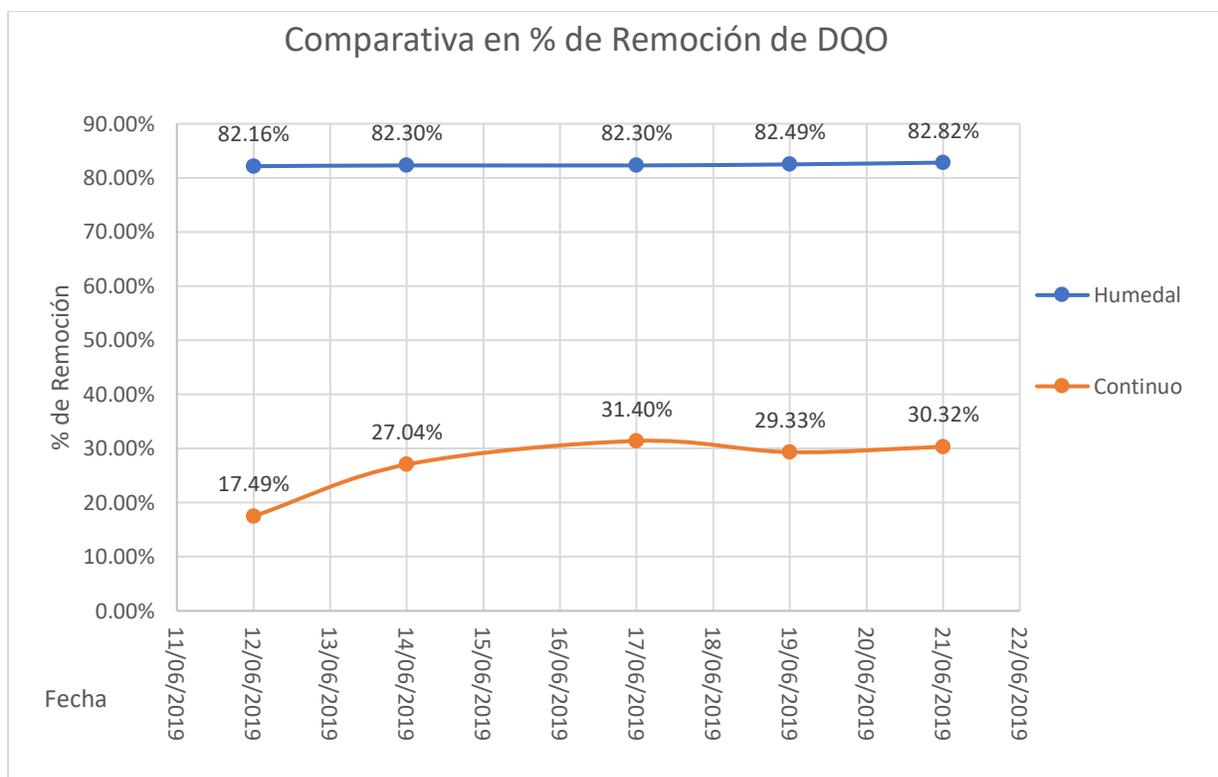
Tabla 5. DQO de afluente y efluente y voltaje de Celdas de Combustible Microbianas (Humedal y Flujo Continuo)



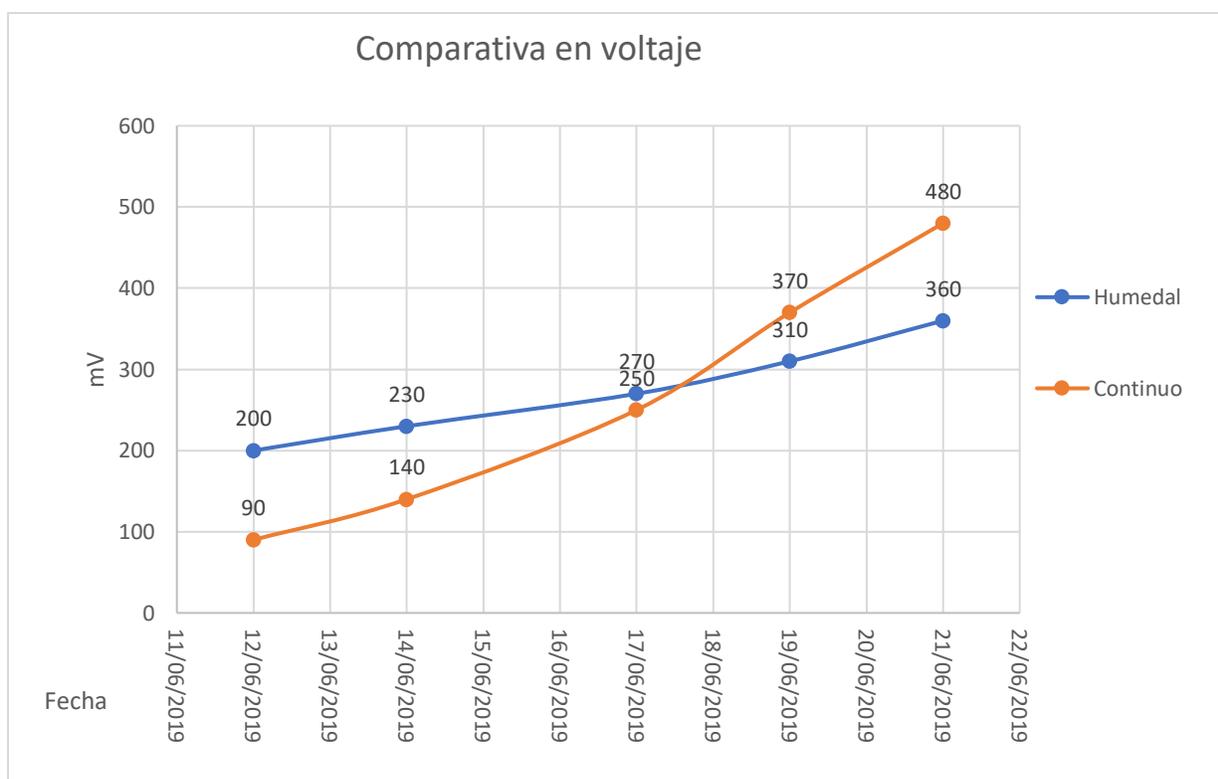
Gráfica 7. DQO de Afluente y Efluente de la Celda de Combustible Microbiana tipo Humedal



Gráfica 8. DQO de Afluente y Efluente de la Celda de Combustible Microbiana de Flujo Continuo



Gráfica 9. Comparativa en % de Remoción de DQO entre la Celda de Combustible Tipo Humedal y la de Flujo Continuo.



Gráfica 10. Comparativa en voltaje entre la Celda de Combustible Tipo Humedal y la de Flujo Continuo.

La Celda de Combustible Microbiana de flujo continuo tiene una mejor eficiencia cambiando su funcionamiento de manera continua a un flujo por lotes, teniendo un tiempo de retención igual a que si se mantuviese de manera continua, esto debido a que se permitió a los microorganismos tener mayor tiempo con el sustrato, dándonos como resultado una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica así como a su vez una mayor generación de energía eléctrica en comparación con el funcionamiento en continuo.

En tanto la de tipo humedal a pesar de comenzar con valores menores en cuanto se estabilizó la población de microorganismos, se pudo apreciar un comportamiento mas eficiente que la de flujo continuo tanto en la generación de energía eléctrica como de la de tratamiento de agua.

Ambas Celdas reportaron una mayor eficiencia energética con agua residual que con agua residual sintética puesto que la carga orgánica era superior, también entre mayor era el tiempo de retención hidráulica los valores de voltaje se veían incrementados

Conclusiones

Al desarrollar este proyecto se hicieron diversas propuestas de diseño y se realizaron modificaciones a lo largo de este tiempo, en un inicio las mangueras de venocllisis resultaron útiles para regular el caudal de ingreso de agua residual. Sin embargo, durante el empleo directo de agua residual se presentó la obstrucción en las mangueras debido a los sólidos presentes en este tipo de agua, por lo que se recomienda que en caso de emplear un sistema similar al de este proyecto, se debe llevar a cabo un tratamiento primario, con la finalidad de remover dichos sólidos, pues este tipo de mangueras son las adecuadas para el flujo de agua requerido.

En cuanto a los tanques de alimentación de agua a las celdas de combustible, así como de la salida, si las dimensiones hubiesen sido superiores habría facilitado los trabajos de limpieza y mantenimiento de estos, ya que las mangueras se obstruían por los sólidos presentes y el reducido espacio no permitía una manejabilidad correcta, también los mismos depósitos no podían ser retirados lo cual también dificultaba mantener en óptimas condiciones los dispositivos, el uso de vinil negro en el almacenamiento del afluente ayudó a prevenir el crecimiento de algas en este, y el acomodo de el sistema como se propuso operó de manera adecuada, permitiendo la operación sin requerir bombeo, minimizando así el consumo energético.

En caso de emplear un sistema en continuo se sugiere para fines experimentales el uso de una bomba peristáltica, la cual permita mantener en recirculación el flujo del agua de manera continua. Los materiales empleados en este prototipo fueron todos útiles, ‘cumpliendo cada uno con su función.

El uso de placas de cobre electrolítico en lugar de placas de acero no afectó en el funcionamiento del mismo de manera significativa, el acrílico de 6 mm de espesor tuvo la capacidad mecánica de resistir la presión ejercida mediante los tornillos y placas de sujeción, el uso de cámara de llanta reciclada cumplió con la función de sello para evitar fugas entre las placas de sujeción, la membrana a su vez también realiza su función pues por lo que se puede ver en la *Gráfica 10* su eficiencia energética es mayor que la del humedal, a pesar de que este sea de dimensiones superiores.

Por su parte, el humedal destaca por su eficiencia de remoción dando valores superiores al 80% de DQO, al inicio requirió un periodo de estabilización mayor al de la otra celda, pero una vez llegado a este su eficiencia mejoró, tuvo un alto porcentaje de remoción, así como un voltaje superior en un inicio.

La primera modificación al igual que al tanque del afluyente fue el forrado con vinil negro para evitar la formación de algas, esto únicamente en la parte inferior del humedal debido a que se podía tener presencia de algas, lo cual propiciaría la presencia de oxígeno en esta zona y afectaría a su operación debido a que ahí se localiza la cámara anaerobia. La planta empleada resultó útil, algo que ya se había demostrado antes en un proyecto PAPIME del laboratorio el cual operaba humedales empleando la misma y dando buenos resultados y adaptándose a las condiciones en las que trabajaba.

Por otro lado, un factor importante que benefició la limpieza del agua fue la presencia de dos capas de carbón activado en la parte inferior y superior de la capa de fibra de vidrio. Un inconveniente que se presentó en el humedal fue que se usó algodón de fibra de vidrio y no una placa como tal, lo cual aun permitió la conductividad y teniendo como resultado que el multímetro nos marcara continuidad eléctrica entre la cámara anódica y catódica, esto indicaba que no todos

los electrones viajaban por el circuito externo, sino que algunos lo hacían dentro del humedal, generando así un impacto en los resultados del voltaje.

Otro inconveniente también fue el de la permeabilidad del cable de cobre empleado para el circuito externo, esto generó corrosión en el mismo y una pérdida mínima de agua a través de este. Por último, el su trato empleado cumplió su función como medio de soporte para los microorganismos, así como un proceso físico de remoción.

Todo lo anterior fue visto en lo particular, pero en general como sistema se pudo determinar que en primer lugar ambos modelos resultaron funcionales tanto en el tratamiento de agua, así como la generación de electricidad, la Celda de Combustible de Flujo Continuo mejora su funcionamiento aumentando el tiempo de retención hidráulico o cambiando su operación de flujo continuo a operación por lotes. El humedal puede mejorar en el aspecto eléctrico cambiando el algodón de fibra de vidrio por una placa para limitar la conductividad entre cámaras y forzar a que los electrones viajen por un circuito externo.

En comparativa, en el aspecto de eficiencia de remoción el humedal resulta superior, y en la parte energética la Celda de flujo continuo presenta una tendencia de superior a la del humedal pues este se mantiene con un comportamiento lineal.

Ahora bien, viéndolo en el aspecto económico, los componentes de la Celda de Combustible de Flujo Continuo representan un costo superior al de los componentes de la Celda de Combustible tipo Humedal por lo que dependiendo el uso principal que se les quisiera dar sería más recomendable una que otra, si lo primordial fuese el tratamiento de agua, el humedal sería el indicado, siempre y cuando se cuente con el espacio suficiente, mientras que si la parte eléctrica

es de mayor importancia el Celda de Combustible de Flujo Continuo es mas beneficiosa siendo un punto a destacar el reducido espacio que ocupa.

Uso de los dispositivos

Estos dispositivos fueron construidos como parte del proyecto PAPIME PE105816 dirigido por el M. en C. Sergio Alfonzo Martínez González con fines didácticos por lo que esperamos que le sea de utilidad a los compañeros de actuales y futuras generaciones de la carrera de Ingeniería Civil, con el fin de que conozcan otras alternativas para la generación de energía eléctrica y el tratamiento de agua residual, y que estos mismos dispositivos sienten un precedente para que en un futuro en caso de que se desarrollase esta tecnología se pueda emplear para fomentar una construcción sustentable.

Así mismo esperamos que estos dispositivos no se queden en su condición actual, están construidos con el fin de que puedan ser desarmados y vueltos a ensamblar para que nuestros compañeros en un futuro también experimenten, investiguen y propongan modificaciones que permitan mejorar la eficiencia de los mismos para fomentar alternativas de energías limpias que lejos de generar residuos nos ayuden a reducirlos y que puedan generar el impacto positivo en la sociedad que nuestra profesión como Ingenieros Civiles nos demanda.

Referencias

- Carmona, A. A. (2008). *Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- Cervantes, C. (2011). *Biodregradación de aguas residuales y producción de electricidad en una Celda de Combustible Microbiana* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Chafloque, W. A., & Gómez, E. G. (2012). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Recuperado el 14 de 2 de 2019, de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/699>
- CONAGUA. (2017). *Estadísticas del Agua en México, Edición 2017*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Das, D. (2018). *Microbial Fuel Cell*. Delhi: Springer.
- Diario La Paz. (11 de julio de 2018). *El agua en la Paz*. Obtenido de <http://elaguaenlapaz.mx/noticias/locales/hay-sobreexplotacion-en-mantos-acuiferos-de-la-paz-y-los-cabos/>
- Du, Z. H. (2007). *A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy*. Biotechnology Advances.
- FAO. (2014). *Total renewable water resources per inhabitant in 2014 (m³/year)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fernández, M. (2009). *Celdas de Combustible*. Universidad de los Andes, Mérida. Recuperado el 22 de 11 de 2018, de http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/9/TDE-2010-02-03T17:07:41Z-739/Publico/FernandezMaribel.pdf

García, R. M. (2015). *Optimización y caracterización de materiales para su uso en placas bipolares de celdas de combustible hidrógeno de tipo PEM*(Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

González del Campo, A. (2015). *Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustibles microbiológicas* (Tesis de Doctorado). Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.

INEGI. (2009). *Electricidad*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/parque/electricidad.html>

INEGI. (11 de Abril de 2018). Obtenido de Población, Hogares y Vivienda: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=17484>

Judd, J. (30 de Enero de 2013). *Engledow Group*. Recuperado el 7 de Febrero de 2019, de <https://www.engledow.com/green-scene/2013/01/plant-of-the-month-peace-lily-spathiphyllum/>

Kim, H. J., Park, H. S., Hyun, M. S., Chang, I. S., Kim, M., & Kim, B. H. (14 de Febrero de 2002). A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme and Microbial Technology*, págs. 145-152.

Landeros A., S., Matabuena C., P., & Solorza F., O. (Abril de 2006). *Ciencia y desarrollo El conocimiento a tu alcance*. Obtenido de Tecnología del Hidrógeno:

<http://www.cyd.conacyt.gob.mx/194/Articulos/Tecnologiadelhidrogeno/Tiposdeceldas03.html>

Linwood, J. (6 de Febrero de 2009). Obtenido de flickr:
<https://www.flickr.com/photos/brighton/3257252681>

Martínez Crespo, L. (2015). Aplicacion de sistemas bio-electroquímicos en humedales construidos para la generación de energía renovable durante el tratamiento de aguas residuales (711- TES-CA-5888). (*Tesina de especialidad*). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Barcelona.

Martinez-Austria, P. &. (2019). *Seguridad hídrica en México*. Obtenido de 10.4995/Ia.2019.10502.

National Centers for Environmental Information. (7 de Noviembre de 2018). *National Centers for Environmental Information*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2017/13/supplemental/page-5>

O'Hayre, R., Cha, S.-W., G. Colella, W., & B. Prinz, F. (2016). *Fuel Cell Fundamentals*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Organización de las Naciones Unidas. (30 de Octubre de 2018). *Agua*. Obtenido de Asuntos que nos importan: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>

Organización de las Naciones Unidas. (30 de Octubre de 2018). *Cambio Climático*. Obtenido de Asuntos que nos importan: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (25 de Octubre de 2018). Obtenido de ACUASTAT:

<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>

Park, H. S., Kim, B. H., Kim, H. S., Kim, H. J., Kim, G. T., Kim, M., . . . Chang, H. I. (1 de Diciembre de 2001). A Novel Electrochemically Active and Fe(III)-reducing Bacterium Phylogenetically Related to *Clostridium butyricum* Isolated from a Microbial Fuel Cell. *Anaerobe*, págs. 297-306.

Pérez, N. M. (Marzo de 2007). Contaminación atmosférica y salud. *Revista de ciencia y cultura*, 14(65), 29. Recuperado el 23 de julio de 2019, de <http://www.elementos.buap.mx/num65/htm/29.htm>

Pérez, V., & Maira, G. (2011). *Diseño e Implementación de Un Sistema Para Adquirir Las Variables Energéticas y Monitoreo En Línea de Un Sistema Híbrido Solar-Hidrógeno-Celda de Combustible*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Racines Guzman, Y., & Santander Boccio, M. (2016). IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO A PARTIR DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA. (*Tesis de licenciatura*). Universidad de la Costa, Barranquilla.

Ridgway, S. (5 de Octubre de 2013). *Flickr*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/stephanridgway/10091408906/in/photostream/>

Sivasankar, V., Mylsamy, P., & Omine, K. (2018). *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*. Nagasaki: Springer.

Sosa, A., & Leonel, E. (2015). *Remoción de metales pesados en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes*. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

The Word's Water. (25 de Octubre de 2018). Obtenido de Water Conflict Chronology: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>

Tibaquirá G., J. E., & Posner, J. D. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica Año XV*, 75.

U.S. Air Force. (29 de Mayo de 2007). *Air Force Photos*. Obtenido de U.S. Air Force: <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/126704/airmen-save-lives-in-africa-with-medical-team-visit/>

U.S. Geological Survey. (2016). Obtenido de The USGS Water Science School: <https://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>

UK Department for International Development. (29 de Septiembre de 2011). Obtenido de flickr: <https://www.flickr.com/photos/dfid/6220146368/in/photostream/>

Universidad Pablo de Olavide. (2004). *Práctica 4 Determinación de la Materia Orgánica en Aguas: Demanda Química de Oxígeno*. Obtenido de https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP4_0405.pdf

Vanguardia MX. (14 de 05 de 2019). No es solo la Ciudad de México, hay 11 estados con mala calidad del aire. *Vanguardia MX*.

Victoria Falco, M. (2016). Obtención de energía eléctrica a partir de sedimento de humedal artificial en celdas de combustible microbianas y estudio de las comunidades microbianas. *Ingeniería*. Universidad ORT, Uruguay.

Wikipedia. (17 de Junio de 2019). *Pila de combustible*. Obtenido de Wikipedia: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible

Behling, N. H. (2013). Chapter 2 – Fuel Cells and the Challenges Ahead. *Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research Needs*, 7–36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56325-5.00002-8>

Breeze, P. (2018). The Fundamentals of Fuel Cell Operation. *Fuel Cells*, 11–21. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101039-6.00002-9>

Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C., & Sánchez Flores, E. (2015). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas*. <https://doi.org/10.14350/rig.32452>

Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S.-E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745–756. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2015.03.031>

Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, 225–244. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.03.109>

Sotres, A., Tey, L., Bonmatí, A., & Viñas, M. (2016). Microbial community dynamics in

continuous microbial fuel cells fed with synthetic wastewater and pig slurry. *Bioelectrochemistry*, *111*, 70–82. <https://doi.org/10.1016/J.BIOELECHEM.2016.04.007>

Spiegel, C. (2008). An Introduction to Fuel Cells. *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/b978-012374259-9.50002-1>

Wen, Q., Wu, Y., Cao, D., Zhao, L., & Sun, Q. (2009). Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater. *Bioresource Technology*, *100*(18), 4171–4175. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.02.058>