

Diseño y fabricación de un sistema de celdas de combustible microbianas para su posible uso doméstico

Sheyla Nohemí Pérez-Arenales¹, Amy Pamela Montiel-Carrillo², Jessica Inaya Olmos-Rodríguez², María Fernanda Rodríguez-Bravo², María del Pilar Restrepo-Elorza², Karla Yuritzi Álvarez-Rivera², Guillermo Manuel González-Guerra², Alejandro Alatorre-Ordaz².

¹ Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería

² México. Universidad de Guanajuato. Departamento de Química.

2145734000101@ingenieria.usac.edu.gt, ap.montielcarrillo@ugto.mx, ji.olmosrodriguez@ugto.mx,
mf.rodriguezbravo@ugto.mx, mdp.restrepoelorza@ugto.mx, ky.alvarezrivera@ugto.mx, gm.gonzalezguerra@ugto.mx,
alatorre@ugto.mx

^{1,2} (+52) 473 732 0006 Ext. 5408

Resumen

En la actualidad, la demanda energética y el cambio climático son problemáticas mundiales de gran importancia. Debido a esto, surge la necesidad del uso de fuentes de energía capaces de involucrar recursos renovables. Entre estas alternativas se encuentran las celdas de combustible microbianas (CCMs), las cuales son una tecnología emergente con la capacidad de convertir energía química en energía eléctrica a través de la degradación de un sustrato. En este trabajo se logró diseñar y fabricar seis celdas de combustible microbianas con materiales reciclados variando el tipo de electrodo que contenía cada celda, conteniendo una membrana de Nafion y usando como sustratos composta y agua residual. Durante cinco días se evaluó el desempeño eléctrico de cada una de las celdas, teniéndose tres de ellas en la zona de Marfil y las otras tres en la zona sur de la ciudad de Guanajuato, para así analizar el cómo se veían afectadas por los factores climatológicos como temperatura y humedad en cada una de estas zonas. Se tomaron medidas de las variables cada 8 horas, las cuales fueron voltaje, pH, temperatura y humedad. Finalmente, con base a los resultados se logró concluir que la CCM6 fue la que presentó un mejor desempeño eléctrico, teniendo como electrodos tela de carbono.

Palabras clave: Energía; celdas; combustible; microorganismos.

Introducción

La energía eléctrica es la forma de energía más utilizada y es fundamental para realizar gran parte de las actividades diarias, lo cual permite mejorar la calidad de vida. En México, la mayor parte de la generación de electricidad se realiza a través del petróleo, carbón y gas natural, impactando de manera importante el medio ambiente al depender de los recursos no renovables, como son los combustibles fósiles. Al utilizarlos se emite a la atmósfera una gran cantidad de gases de efecto invernadero, los cuales, provocan el calentamiento global de la tierra, cuyos efectos se están manifestando y son devastadores [1].

Actualmente, la demanda energética va en aumento a nivel mundial. Debido a esta problemática, es de interés el uso de fuentes de energía que involucren recursos renovables, con el propósito de mitigar el cambio climático sin descuidar la demanda de energía. Una tecnología emergente de este tipo son las celdas de combustible microbianas (CCMs) las cuales podrían llegar a ser una forma de abarcar dos problemáticas actuales, la crisis energética y el cuidado del ambiente. Esta alternativa utiliza microorganismos para convertir energía química en energía eléctrica.

Las celdas de combustible microbianas (CCMs), "Microbial fuel cells" (MFCs por sus siglas en inglés), son sistemas Bio-electrobioquímicos que tienen dos funciones: la conversión de energía bioquímica a energía eléctrica y el saneamiento de soluciones al degradar mediante microorganismos los sustratos contenidos en dichas soluciones. La configuración básica de una CCM consiste en una cámara anódica donde reside el ánodo y contiene la solución con sustrato a degradar u oxidar, una cámara catódica donde reside el cátodo y contiene la solución que será reducida, una

membrana de intercambio de protones (también denominada PEM por sus siglas en inglés) que conecta ambas cámaras y un circuito eléctrico externo entre ambos electrodos, lo cual es un arreglo típico de una celda electrofítica de tipo galvánico [2], como es observado en la Figura 1.

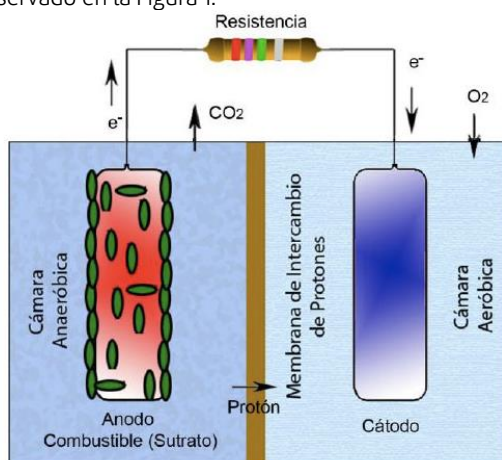
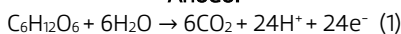


Figura 1. Detalles principales de una CCM de membrana tipo PEM [3].

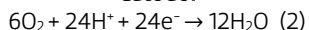
Dentro de la celda se llevan a cabo dos procesos químicos: en el ánodo se desarrolla la oxidación de un sustrato orgánico biodegradable y en el cátodo una reacción de reducción con el oxígeno de la cámara, en otras palabras, en la cámara anódica se lleva a cabo el proceso de degradación de materia orgánica debido a la presencia de bacterias anaerobias electroactivas, dicho proceso tiene como resultado o salida la producción de dióxido de carbono además de electrones y protones [4]. Debido a estos procesos químicos llevados a cabo en cada una de las cámaras de una CCM, se da una diferencia de pH en las mismas. Los gradientes de pH se producen por la acidificación en la cámara anódica y la alcalinización en la cámara catódica, esto se presenta debido a que en las reacciones anódicas se producen protones y en las reacciones del cátodo se consumen protones [3]. Cabe mencionar que estas reacciones se llevan a cabo debido a la acción de los microorganismos y su respiración anaerobia al oxidar los sustratos, generando electrones y protones.

Reacciones llevadas a cabo en una Celda de Combustible Microbiana [4]:

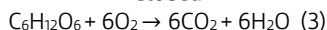
Ánodo:



Cátodo:



Global:



Los electrones producidos son llevados del ánodo al cátodo a través de un circuito externo; y los protones mediante la PEM, esto para mantener la electroneutralidad. Por esa característica de funcionamiento, se dice que una CCM convencional es mitad biológica, ya que las bacterias sólo se encuentran en el ánodo. Estos microorganismos utilizan cuatro maneras posibles para transferir los electrones al ánodo, ya sea mediante intermedios metabólicos, mediadores redox, nanocables conductivos, o citocromos periplásmicos ligados a la membrana. Los materiales más utilizados en el ánodo están hechos de materiales de carbono que contienen: fibra de grafito, tela de carbono, varilla de grafito, papel de carbono, carbono vítreo reticulado (RVC) y fieltro de carbono, por su estabilidad en cultivos microbianos, alta conductividad eléctrica y vasta superficie [4]. En cuanto a la membrana (PEM), su función es actuar como una barrera para la restricción de la difusión de oxígeno del cátodo al ánodo mientras que es permeable a la mitigación de protones desde el ánodo al cátodo [5].

Por otro lado, el sustrato es uno de los aspectos más importantes de la CCM porque constituye el combustible a partir del cual se genera la energía. En la literatura científica se encuentran diversos trabajos en los que se emplea una gran variedad de sustratos, desde compuestos puros hasta mezclas complejas. En los primeros años, sustratos

simples como glucosa y acetato eran de uso general, pero en los últimos años las investigaciones se centran en la utilización de sustratos menos convencionales con el fin de utilizar la biomasa presente en aguas residuales de diverso tipo y adicionalmente depurarlas y generar energía. El uso de sustratos complejos en una CCM es de gran interés porque, además de ser fuentes de energía, estos se pueden degradar y/o biorremediar antes de su descarga al medio ambiente [3].

Como se mencionó anteriormente, las CCMs son una tecnología emergente que podrían llegar a ser una forma de abarcar dos problemáticas actuales, la crisis energética, por un lado, y esto debido a que varios autores mencionan que las CCMs son capaces de producir voltaje, pero con diferentes conformaciones de celda [3,5,6]. Por otro lado, la otra problemática siendo el cambio climático, debido a que producen menor cantidad de dióxido de carbono que cualquier otra tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar energía [3]. Además de esto, tienen la capacidad de mejorar la calidad del agua degradando el sustrato utilizado y eliminando algunos contaminantes.

Se ha hecho una extensa investigación de las CCMs, presentando diferentes conformaciones, una variación en sustratos, electrodos y membranas [5,6,7].

Sin embargo, cabe mencionar que las CCMs enfrentan algunos retos, tales como su alto costo, la baja generación de energía, que la mayoría de sus aplicaciones aún se encuentran a nivel de laboratorio y finalmente que no hay reproducibilidad en los modelos actuales. Por todo lo anterior, es necesario realizar un análisis de conformaciones que puedan aplicarse a nivel casero, con materiales accesibles y en donde se pueda presentar un diseño de experimentos de variables importantes en las CCMs; como lo es el electrodo, la membrana, el pH, la temperatura y la humedad. Adicional a esto, se hace el estudio de las conformaciones en dos diferentes localidades de una región, para mostrar con mayor claridad la reproducibilidad de la presente investigación.

Metodología

La investigación desarrollada a lo largo de este proyecto tuvo varios enfoques que completaron un perfil multidisciplinario del equipo de trabajo, pues se realizaron actividades de investigación descriptiva y/o explicativa en la interpretación y presentación de los resultados, así como en el diseño de la metodología a seguir para la evaluación del funcionamiento de las Celdas de Combustible Microbianas. Del mismo modo, fue necesario desarrollar una investigación documental para fundamentar las pruebas realizadas y comprobar la metodología empleada en el pasado.

La mayoría de los materiales y equipo necesarios para el desarrollo de este proyecto fueron elaborados con material reciclable. Anteriormente en el grupo de trabajo se evaluó el funcionamiento de las CCM's y los factores que influyen en su eficiencia comparando el tipo de membrana que contienen proponiendo dos modelos iniciales los cuales son CCM1 y CCM2. Estos modelos utilizaban como puente salino o membrana selectora el Agar CERTRAMIDE, así como electrodos de aluminio y barras de grafito respectivamente, pero al comparar su producción de electricidad con los modelos que utilizaban membrana de Nafion (CCM3 y CCM4) se observó estos últimos producían más voltaje. Con base a los resultados obtenidos en esta investigación previa se propone evaluar la influencia del tipo de electrodo utilizado en CCM's que contienen membrana de Nafion.

La celda de combustible microbiana tiene 3 partes importantes: los electrones, la membrana selectora de protones o medidor y el cuerpo o estructura de la celda. Durante el proyecto se diseñaron cuatro modelos de celdas variando el tipo de electrodos, en la tabla 1 se muestran las características estructurales de cada modelo de celda.

Tabla 1. Modelos de celdas de combustible elaborados y su descripción de estructura.

Cantidad	Modelo	Tipo de electrodos	Tipo de membrana	Tipo de sustratos	
				Cámara anódica	Cámara catódica
2	CCM3	Placas de aluminio	Nafión	Composta (materia orgánica)	Agua residual
2	CCM4	Barras de grafito			
1	CCM5	Lámina de carbono			
1	CCM6	Tela de carbono			

Membranas

Para la activación de las membranas de Nafion se realizó un tratamiento previo. El cual consistió en baños de H_2SO_4 0.5M, H_2O destilada, H_2O_2 al 3%vol en donde cada baño tuvo una duración de una hora, conservando una temperatura de 80 °C y una agitación constante [7].

Electrodos

La estructura de los electrodos de cada modelo de celda depende del tipo de material en qué consisten. La figura 2 muestra el diseño de cada tipo de electrodo.



Figura 2. Electrodos de CCM3, CCM4, CCM5 y CCM6 (de izquierda a derecha).

Estructura

Para el caso de las celdas con modelo CCM3, CCM4 y CCM6 la estructura de la celda se realizó con dos botellas de plástico de 1 L de capacidad, estas se ensamblaron horizontalmente colocando la membrana en la unión de ambas bocas. Una vez comprobando que no existieran fugas en el sistema se incorporaron en una de las botellas materia orgánica o composta (cámara anódica). En la otra botella se agregó agua residual (cámara catódica) para finalizar añadiendo los electrodos en su cámara correspondiente.

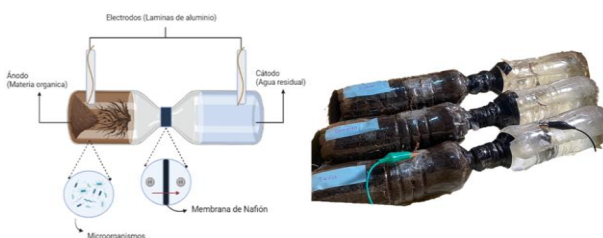


Figura 3. Estructura de los modelos de celda CCM3, CCM4 y CCM6.

Para el modelo CCM5 se realizó con una estructura de celda propuesta en la figura 3 la cual está hecha de acrílico.

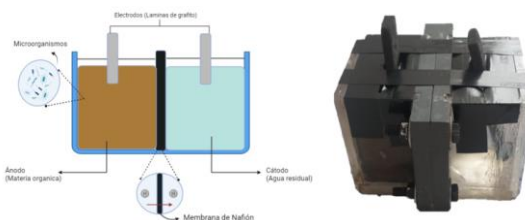


Figura 4. Estructura del modelo de celda CCM5.

Valoración de Celdas de Combustible Microbianas

Conectamos el cable de cobre de cada electrodo a un caimán el cual cada 8 horas se iba midiendo con ayuda de un multímetro el voltaje de corriente directa por un periodo de 5 días tomando en cuenta variables climatológicas como la temperatura y humedad además del pH de cada cámara en la celda (anódica y catódica).

Resultados

Siguiendo la metodología planteada se realizaron cuatro modelos de CCM ubicados geográficamente en dos zonas distintas en la ciudad de Guanajuato siendo Marfil y Zona sur. Para cada zona se midieron variables climatológicas de temperatura y humedad, estos datos fueron obtenidos de la base de datos The Weather Channel [8].

Para la zona de marfil se elaboraron tres modelos de celda y como se puede observar en la tabla 2 efectivamente cada celda produjo un voltaje medible significativo mostrando diferencias en la cantidad de voltaje producido por celda dependiendo del tipo de electrodo utilizado.

Tabla 2. Datos de voltaje producido por cada modelo de celda y variables climatológicas de temperatura y humedad de la zona de Marfil, Gto.

Horas	Voltaje (mV)			Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
	CCM3	CCM4	CCM5		
0	79	53.6	36.7	22	69
8	28	13.9	29.4	18	73
16	38.7	44.9	55.2	16	88
24	27	63.1	130.5	21	78
32	39.1	68.6	164.8	18	73
40	107	99.7	178.8	15	50
48	73.6	107.7	183.4	25	53
56	89.5	108.1	198.4	18	79
64	75.3	111.5	202.5	17	73
72	101.4	93.5	207.8	27	37
80	105.4	99.4	208.9	17	70
88	110.3	119.3	211.1	16	67
96	91.3	92.8	212.6	24	40
104	55.1	41.3	203.4	18	73
112	48.6	42.8	205.6	15	78

Se graficaron los datos obtenidos de voltaje producido por cada modelo de celda para evaluar las fluctuaciones que existían a lo largo de los días. La gráfica 1 permite observar que el modelo CCM5 fue el que produjo un mayor voltaje y obtuvo un mínimo de fluctuaciones logrando ser constante su potencial eléctrico. Por otro lado, el modelo CCM3 fue el que mantuvo un mayor número de fluctuaciones impidiendo que su voltaje se mantuviera constante y logrando ser el modelo de celda que produjo menor cantidad de electricidad.

Comparando los datos obtenidos para la celda que produjo mayor voltaje (CCM5) se observa que a mayor temperatura (24 °C) y menor humedad (40%) se obtiene el valor más alto obtenido de 212.6 mV.

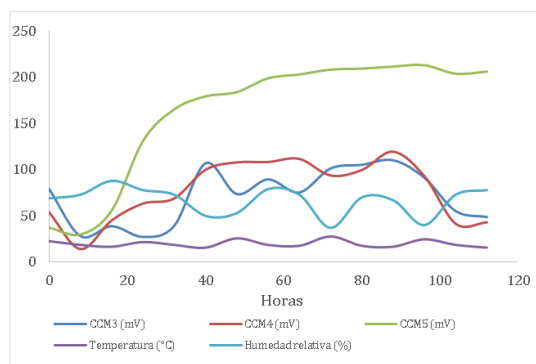


Figura 5. Voltaje producido por cada modelo de celda

Para obtener los valores de pH de cada cámara en las CCM's se utilizaron tiras de pH de la marca MACHEREY-NAGEL consiguiendo los siguientes datos mostrados en la tabla 3.

En la gráfica 2 se muestra que los modelos CCM3, CCM4 y CCM5 siguieron el mismo comportamiento y a las 16 horas la cámara anódica de cada celda se acidificó ligeramente esto gracias a que las reacciones realizadas en la cámara anódica se producen protones y en la catódica se consumen protones.

Tabla 3. Valores obtenidos de pH en cada cámara de los modelos CCM3, CCM4 y CCM5.

Horas	CCM3		CCM4		CCM5	
	pH		pH		pH	
	Cámara anódica	Cámara catódica	Cámara anódica	Cámara catódica	Cámara anódica	Cámara catódica
0	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8
16	7	8	7	8	7	8
24	7	8	7	8	7	8
32	7	8	7	8	7	8
40	7	8	7	8	7	8
48	7	8	7	8	7	8
56	7	8	7	8	7	8
64	7	8	7	8	7	8
72	7	8	7	8	7	8
80	7	8	7	8	7	8
88	7	8	7	8	7	8
96	7	8	7	8	7	8
104	7	8	7	8	7	8
112	7	8	7	8	7	8

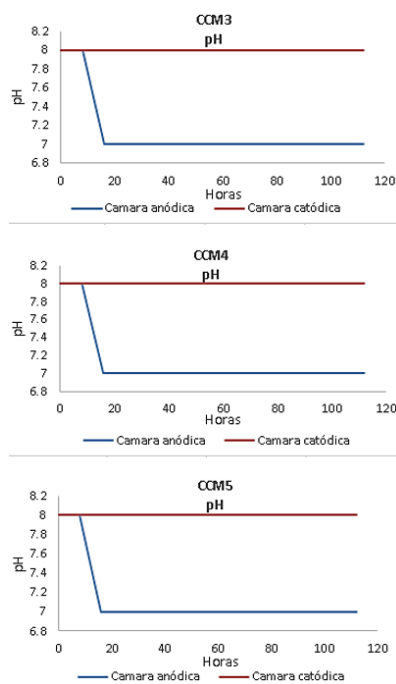


Figura 6. Datos de pH en cada modelo de celda en función de las horas.

Para la zona de sur de Guanajuato se elaboraron tres modelos de celda y como se puede observar en la tabla 4 efectivamente cada celda produjo un voltaje medible significativo mostrando diferencias en la cantidad de voltaje producido por celda dependiendo del tipo de electrodo utilizado.

Tabla 4. Datos de voltaje producido por cada modelo de celda y variables climatológicas de temperatura y humedad de la zona de sur de Guanajuato.

Horas	Voltaje (mV)			Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
	CCM3	CCM4	CCM6		
0	213	116	85	22	69
8	286	262	78	17	83
16	164	339	108	16	87
24	237	226	369	24	53
32	237	392	208	17	80
40	182	408	236	16	85
48	88	395	293	23	57
56	137	398	371	17	80
64	167	400	386	17	72
72	189	394	396	27	37
80	142	402	417	17	69
88	173	408	411	18	67
96	15	402	400	24	40
104	97	393	414	17	80
112	92	403	412	17	82

De igual manera se graficaron los datos obtenidos de voltaje producido por cada modelo de celda cada 8 horas para evaluar las fluctuaciones que existían a lo largo de los días. La gráfica 3 permite observar que el modelo CCM6 fue el que produjo un mayor voltaje y obtuvo un mínimo de fluctuaciones logrando ser constante su potencial eléctrico. Por otro lado, el modelo CCM3 fue el que mantuvo un mayor número de fluctuaciones impidiendo que su voltaje se mantuviera constante y logrando ser el modelo de celda que produjo menor cantidad de electricidad además de que su disminución de voltaje fue gradual.

Comparando los datos obtenidos para la celda que produjo mayor voltaje (CCM6) se observa que menor temperatura (18 °C) y mayor humedad (69%) se obtiene el valor más alto obtenido de 417 mV.

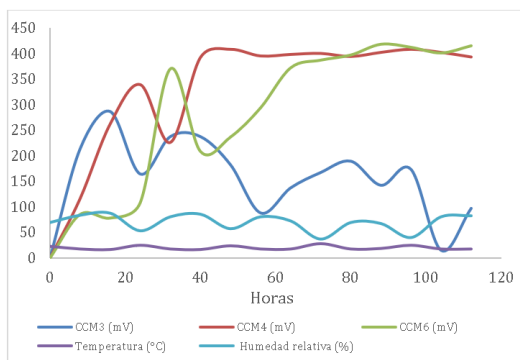


Figura 7. Voltaje producido por cada modelo de celda.

Los valores de pH de cada cámara en las CCM's se obtuvieron usando tiras de pH de la marca MACHEREY-NAGEL consiguiendo los siguientes datos mostrados en la tabla 5.

En la gráfica 4 se muestra que todos los modelos de celda mantuvieron un comportamiento distinto, la CCM3 no cambio su pH en ninguna cámara. En los modelos CCM4 y CCM6 lograron acidificar la cámara anódica después de las 80 y 48 horas respectivamente.

Tabla 5. Valores obtenidos de pH en cada cámara de los modelos CCM3, CCM4 y CCM6.

Horas	CCM3		CCM4		CCM6	
	pH		pH		pH	
	Cámara anódica	Cámara catódica	Cámara anódica	Cámara catódica	Cámara anódica	Cámara catódica
0	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8
16	8	8	8	8	8	8
24	8	8	8	8	8	8
32	8	8	8	8	8	8
40	8	8	8	8	8	8
48	8	8	8	8	7	8
56	8	8	8	8	7	8
64	8	8	8	8	7	8
72	8	8	8	8	7	8
80	8	8	7	8	7	8
88	8	8	7	8	7	8
96	8	8	7	8	7	8
104	8	8	7	8	7	8
112	8	8	7	8	7	8

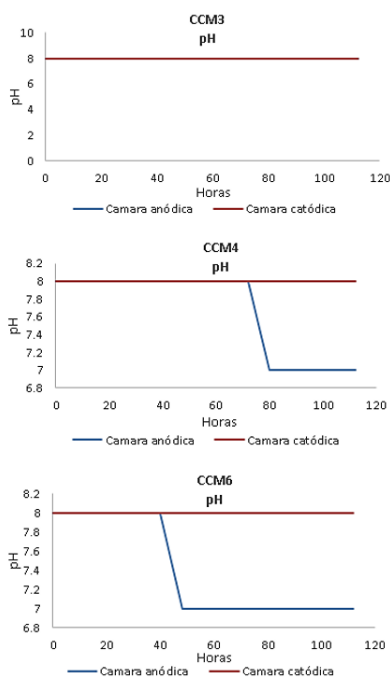


Figura 8. Datos de pH en cada modelo de celda en función de las horas.

Comparando los resultados obtenidos en ambas zonas geográficas se observa que el comportamiento de los modelos CCM3 y CCM4 serán similares alcanzando voltajes máximos a una temperatura baja y humedad alta independientemente de la zona geográfica en la cual se encontraban. Para el caso de los modelos CCM5 y CCM6 este comportamiento no se puede atribuir a variables climatológicas de temperatura y humedad, esto se relaciona al tipo de conformación de los electrodos en cada modelo de celda siendo lámina de carbono y tela de carbono para los modelos CCM5 y CCM6 respectivamente.

En general, el modelo CCM6 demostró obtener valores más altos de voltaje siendo el mayor de 417 mV. Esto se debe a que este modelo utilizó electrodos de tela de carbono, los cuales poseen una mayor área electroquímicamente activa diferente a la de los demás electrodos utilizados. Debido a esto y al volumen de los poros de su conformación, se logró obtener un mejor desempeño eléctrico en este modelo de celda.

Conclusiones

Se logró diseñar y fabricar seis celdas de combustible microbianas con materiales reciclados variando el tipo de electrodo que contenía cada celda, conteniendo una membrana de Nafion y usando como sustratos agua residual y composta.

Se realizaron mediciones de voltaje producido por cada celda cada 8 horas en un lapso de 5 días. Los resultados demuestran que el modelo CCM6 que contiene electrodos de tela de carbono produjo un mayor potencial eléctrico y el modelo CCM3 obtuvo los valores más bajos de voltaje. Para los modelos CCM3 y CCM4 fue similar su comportamiento independientemente de la zona geográfica donde se encontraban ubicados. Cabe destacar que los valores de pH obtenidos en las cámaras anódica y catódica de cada celda demuestran que se están llevando a cabo las reacciones químicas características de una Celda de Combustible Microbiana, esto debido a la degradación de la glucosa lo cual fue previsto en la bibliografía consultada.

Es posible concluir que el potencial de estos dispositivos es enorme y, por ende, la importancia de su investigación, por lo que se pretende seguir con esta línea de investigación para proponer el acoplamiento de estos dispositivos en el uso doméstico y contribuir en la mejora del medio ambiente.

Referencias

- [1] Importancia del Ahorro de Energía Eléctrica | Secretaría de Educación. Se.jalisco.gob.mx. (2013). Obtenido el 18 de julio de: <https://se.jalisco.gob.mx/content/importancia-del-ahorro-de-energia-electrica>.
- [2] Nava-Diguero, P., & Castillo-Juárez, M. (2018). Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad: Agua, energía y contaminación. Recuperado: https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Innovativa/vol2num5/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V2_N5_3.pdf.
- [3] Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. Información tecnológica, 24(6), 7-8. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642013000600004>
- [4] Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. (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>
- [5] Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. Electrochemistry Communications, 125, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- [6] Soh, S., Lee, D., & Mitchell, R. (2020). Enhanced microbial fuel cell (MFC) power outputs through Membrane Permeabilization using a branched polyethyleneimine. Biosensors And Bioelectronics, 170, 112623. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112623>
- [7] González Guerra, Guillermo Manuel (2015). Evaluación de un polisiloxanos perarilado sulfonado como ionómero en celda de combustible tipo PEM. (Tesis Licenciatura). Universidad de Guanajuato, división de ciencias naturales y exactas.
- [8] The Weather Company An IBM Business. (2021). Pronóstico del tiempo y condiciones meteorológicas para Guanajuato, Guanajuato: The Weather Channel | Weather.com. The Weather Channel. <https://weather.com/es-MX/tiempo/hoy/l/968c52637efa20dd1068ff7d658763059ab458e69cda87d59d40afe7278a6b77>