

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Diseño de las Celdas de Combustible Microbianas
considerando los antecedentes de producción de
bioelectricidad utilizando *Gebacter sulfurreducens***

Por:

Fredy Ore Huamán

Edyn Smith Pompa Quispe

Asesor:

Mg. Gina Marita Tito Tolentino

Lima, julio de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Mg. Gina Marita Tito Tolentino, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“Diseño de las Celdas de Combustible Microbianas considerando los antecedentes de producción de bioelectricidad utilizando *Gebacter sulfurreducens*”** constituye la memoria que presenta los estudiantes **Fredy Ore Huamán** y **Edyn Smith Pompa Quispe**, para aspirar al Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de Investigación ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Lima, a los 20 días de agosto del año 2020.



Mg. Gina Marita Tito Tolentino

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a.....30..... día(s) del mes de.....julio.....del año ..2020.. siendo las....10:50....horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):
 Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodriguez.....el(la) secretario(a):
Ing. Samuel Tito De La Cruz Napan..... y los demás miembros:
 Mg. Luis Alberto Palacios Choque, Mg. Santiago Ramirez Lopez.....
y el(la) asesor(a) Lic. Gina Marita Tito Tolentino.....
con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado: Diseño de las Celdas de Combustible Microbianas considerando los antecedentes de producción de bioelectricidad utilizando *Gebacter sulfurreducens*.....
de los (las) egresados (as): a) Fredy Ore Huamán.....
 b) Edyn Smith Pompa Quispe.....
conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en
Ingeniería Ambiental.....
(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando.....a los..... candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por.....los..... candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): Fredy Ore Huamán.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	16	B	Bueno	Muy Bueno

Candidato/a (b): Edyn Smith Pompa Quispe.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior
 Finalmente, el Presidente del jurado invitó.....a los.....candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

_____ Presidente/a	 _____ Secretario/a	
_____ Asesor/a  _____ Fredy Ore Huamán	_____ Miembro	_____ Miembro  _____ Edyn Smith Pompa Quispe

Diseño de las Celdas de Combustible Microbianas considerando los antecedentes de producción de bioelectricidad utilizando *Geobacter sulfurreducens*

DESIGN OF MICROBIAL FUEL CELLS CONSIDERING THE BACKGROUND OF BIOELECTRICITY PRODUCTION USING *Geobacter Sulfurreducens*

¹*ORE HUAMÁN, FREDY; POMPA QUISPE, EDYN SMITH

§EP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Perú.

Resumen

La demanda de consumo de combustibles fósiles conduce al mundo hacia una crisis energética; por lo cual, este artículo tuvo como propósito diseñar celdas de combustible microbianas (CCM) considerando los antecedentes del uso de *Geobacter sulfurreducens* para la producción de bioelectricidad. La metodología utilizada para la investigación fue recopilar información bibliográfica, posteriormente se comparó en el software R la producción de corriente eléctrica (A/m²) de los estudios revisados, además, se utilizó el software AutoCad 2018 para el diseño de la estructura. De la revisión se halló que la producción de energía eléctrica utilizando *G. Sulfurreducens* en las CCM ha tenido un incremento de 0.065 a 12.3 A/m² en tan solo dos décadas. En base a los diferentes estudios revisados se diseñó un prototipo de celdas de combustible microbiana de dos cámaras (tipo H) unidas mediante una membrana de intercambio protónico, para la generación de energía eléctrica de manera sostenible.

Palabras clave: Celdas de combustible microbianas, *Geobacter sulfurreducens*, electrodos, membrana de intercambio protónico.

Abstract

Demand for fossil fuel consumption leads the world towards an energy crisis; Therefore, the purpose of this article was to design microbial fuel cells (MCC), considering the antecedents of the use of *Geobacter sulfurreducens* for the production of bioelectricity. The methodology used for the research was to collect bibliographic information, and the production of electrical current (A / m²) of the reviewed studies was later compared in the R software, and AutoCad 2018 software was used to design the structure. From the review it was found that the production of electrical energy using *G. Sulfurreducens* in the CCM has suffered an increase from 0.065 to 12.3 A / m² in just two decades. Based on the different studies reviewed, a prototype of two-chamber microbial fuel cells (type H) linked by a proton exchange membrane was designed for the generation of electrical energy sustainable.

Key word: Microbial fuel cells, *Geobacter Sulfurreducens*, electrodes, proton exchange membrane.

*Correspondencia de autor: km. 19 Carretera Central, Ñaña, Lima. E-mail: fredyore@upeu.edu.pe.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad más de 7 mil millones de personas habitan en el planeta, este incremento de la población e industrias genera mayor consumo energético lo que ocasiona una mayor demanda de reservas de energías convencionales (Jibaja et al., 2019). El consumo de energía en el mundo se incrementó un 1,3 % en el transcurso del último quinquenio (Promigas, 2018). Los combustibles que favorecieron al incremento con un 75 % en la canasta energética mundial son el petróleo, carbón y gas natural, de los cuales este último fue el que presentó mayores crecimientos en los últimos cuatro años (Promigas, 2018). Esta creciente demanda de energía continúa provocando un elevado consumo de combustibles fósiles, por consiguiente, conducen al mundo hacia una crisis energética alta y potencialmente devastadora sin precedentes (Pandit y Das, 2018). Además, estos recursos energéticos son causa principal de la contaminación atmosférica a nivel mundial, produciendo el incremento del efecto invernadero en el planeta y reduciendo la capa de ozono estratosférico contribuyendo al calentamiento global (Zolezzi, 2017).

Según Cevallos (2019) en la búsqueda de alternativas de nuevas fuentes de energía eléctrica y para mejorar la calidad de vida, se ha venido desarrollando investigaciones en las llamadas celdas de combustible microbianas (CCM) esto debido a sus diversas aplicaciones, así mismo Vargas, Álvarez, Ghezzi y Ticona, (2018) mencionan que las celdas son dispositivos bioelectroquímicos que se hallan compuestas por dos cámaras, una anódica con sistema anaerobio donde los microorganismos transfieren los electrones extraídos de sustancias orgánicas a un electrodo, y una catódica con sistema aerobio que se basa en la reacción de reducción de oxígeno, estas cámaras se encuentran conectadas mediante una membrana de intercambio de protones; concordando con Serment, Lara, Becerril y Ramírez (2017) que indican, que las CCM incluyen el uso de compuestos biodegradables y microorganismos con la capacidad de liberar electrones a través de su metabolismo; por su parte Jiménez, Garibay y Borja, (2018) consideran que los microorganismos en las CCM realizan la transformación de la energía química presente en un sustrato orgánico o inorgánico a energía eléctrica.

La conversión de energía química en eléctrica es una alternativa que ha despertado interés en los últimos años, siendo los microorganismos, como las bacterias, que son capaces de llevar a cabo este proceso dentro de las CCM sin causar impactos negativos al ambiente (Santoro, Arbizzani, Erable y Ieropoulos, 2017). Sin embargo, son pocos los que pueden realizarlo sin la presencia de mediadores (tintes y metales orgánicos) como las *Geobacter sulfurreducens*, estas bacterias crecen en lugares anaerobios y son consideradas como una de las bacterias electrogénicas más eficientes (Serment et al., 2017). En el caso de las Celda de combustible microbiano, estas bacterias electrogénicas crecen en la superficie de los electrodos de recolección de energía de la cámara anódica, interactuando de forma directa con el electrodo sin mediador soluble alguno, formando una población estable y unida que, acoplado a un electrodo catiónico, puede producir continuamente corriente eléctrica a través de la oxidación de materia orgánica o hidrógeno (Bond y Lovley, 2003).

Entendiendo la importancia del desarrollo de energías renovables, el presente artículo de revisión tiene como finalidad Diseñar las Celdas de Combustible Microbianas considerando los antecedentes del uso de *Geobacter sulfurreducens* para la producción de bioelectricidad, ya que en un futuro las CCM se muestra como una fuente alternativa de energía.

REVISIÓN

Góngora, Ochoa, Sosa y Vázquez (2017) mencionan que las celdas de combustible microbiana (CCM) son dispositivos bioelectroquímicos considerados generadores de electricidad que con la utilización de microorganismos realizan la transformación de la energía química presente en un sustrato orgánico o inorgánico a energía eléctrica, además Bond y Lovley (2003) consideran diversas aplicaciones para celdas de combustible microbianas, donde, el uso más práctico es en sedimentos, ya que está diseñada para recuperar la electricidad de la materia orgánica en los sedimentos acuáticos. Revelo, Hurtado, y Ruiz (2013) destacan que las CCM se distinguen de otros sistemas de generación de energía, ya que estas pueden operar de manera eficiente a temperatura ambiente (20°C - 25°C) o incluso a bajas temperaturas (10°C); también, enfatiza que las CCM producen menor cantidad de CO₂ a comparación de tecnologías actuales como las centrales térmicas convencionales que utilizan combustibles fósiles para generar energía, además las celdas tienen un funcionamiento silencioso ya que carece de partes móviles, también presentan altas densidades energética conforme se desarrolla nuevas investigaciones, etc.

Avendaño y Castillo (2018) indican que existen diferentes tipos de CCM como las celdas de dos cámaras tipo H, cuatro partidas, de cámara simple, cátodo de aire, de tipo tubular, entre otras. Aunque los diseños o configuraciones de las CCM sean diferentes, los componentes que las forman, por lo general, siempre son los mismos; por su parte Rodríguez (2017) señala que las CCM más comunes son las de dos cámaras de tipo H, este tipo de celdas constan de tres partes principales: una cámara anódica, una cámara catódica y una membrana de intercambio protónico; siendo la cámara anódica un sistema anaerobio donde contiene microorganismos para la oxidación de sustratos orgánicos, generando por su metabolismo electrones, protones y CO₂, estos microorganismos transfieren al electrodo anódico los electrones capturados, para luego ser transportados hacia el cátodo por medio de un circuito externo; mientras que Jiménez et al. (2018) y Vargas et al. (2018) definen que una cámara catódica es un sistema aerobio que se basa en las reacciones de reducción de oxígeno donde una membrana de intercambio protónico permite el paso de los protones de la cámara anódica a la cámara catódica, como se muestra en la Figura 1.

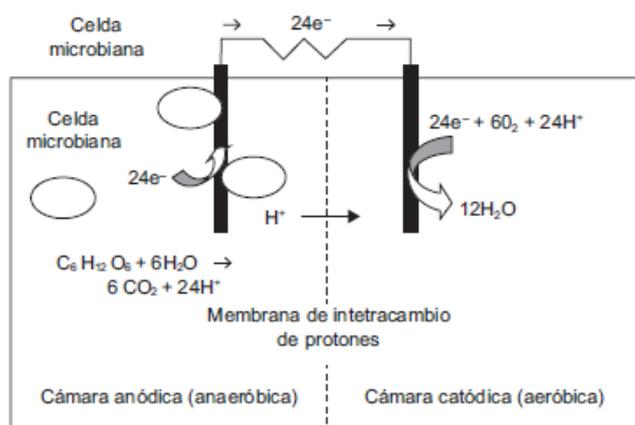
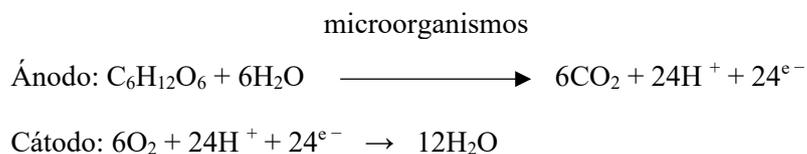


Figura 1. Esquema del modelo de cámaras separadas para una celda de combustible microbiana (con cátodo y ánodo), donde se muestra el balance de glucosa en CO, iones de hidrógeno y electrones que contribuirán a producir una corriente eléctrica. Tomado de *Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la eficiencia de una celda de combustible microbiana*, por Jiménez et al. (2018) <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.13>.

Según Pineda y Rosas (2016) describen de la siguiente manera el funcionamiento de las CCM, en una reacción típica de glucosa como sustrato:



El rendimiento eléctrico de una CCM se estudia a través de las mediciones de voltaje que se obtienen de la resistencia externa conectada entre los electrodos del ánodo y cátodo; además se realizan los cálculos que se derivan de ellas, como la corriente y potencia. (Valencia-Pacho, 2018).

La energía que se genere en una CCM depende de variables fisicoquímicas y biológicas, dentro de la primera tenemos el material de los electrodos, el pH, el diseño del reactor, el tipo de membrana que se use, la temperatura y el tipo de sustrato orgánico; dentro de la segunda variable tenemos al tipo de microorganismo que se utilice (Avendaño y Castillo, 2018).

Según Ríos (2016) afirma que existen varios tipos de microorganismos capaces de producir energía, pero algunos son más eficientes que otros por lo que los más utilizados en estos procesos son las llamadas “bacterias electrogénicas”, sin embargo Esteve-Núñez (2008) refiere que se pueden distinguir dos tipos de estas bacterias, aquellas que elaboran sus propios mediadores redox, que son segregados al medio y reaccionan con el electrodo, y aquellas que interactúan de forma directa con el electrodo sin mediador soluble alguno, éste último siendo del género *Geobacter*.

GEOBACTER

Castro (2019); Bermudez y Bernal (2018) mencionan que el género *Geobacter* está clasificado dentro de la familia de los *Geobacteraceae*, por su parte Romero, Vásquez y Lugo (2012) indican que los más representativos de este género son la especie *Metallireducens* y el *Sulfurreducens*, así mismo Estevez-Canales (2016) afirma que la especie *Sulfurreducens* el más estudiado en la actualidad.

El *Geobacter* fue descubierto en 1987 en el sedimento de agua dulce del río Potomac en Washington D.C, por el Dr. Derek Lovley y un equipo de investigadores de la Universidad de Massachusetts Amherst (Romero et al., 2012). A partir de su descubrimiento hasta hoy en día, Derek Lovley y sus colegas investigadores lograron encontrar más de 20 especies de la familia *Geobacter*, detallando capacidades nuevas como la de poder moverse hacia sustancias metálicas y actividad metabólica aerobia el cual es un indicador de que puede sobrevivir a la presencia de oxígeno (Romero et al., 2012).

Según Castro (2019); Nava y Castillo (2018) señalan que una de las características más importantes que llevan al amplio estudio de los *Geobacter* es la capacidad de transferir electrones sin la necesidad de utilizar mediadores, por lo cual Borjas (2016) y Lovley et al. (2011) describen esta característica como la transferencia de electrones hacia los electrodos por medio de citocromos dispuestos en la membrana y/o pili eléctricamente conductivos.

Bond y Lovley (2003) realizaron muchos estudios desde su primer aislamiento del *G. Sulfurreducens*, donde encontraron una característica muy importante de esta bacteria; la cual era la capacidad de poder respirar electrodos. Esto involucra la oxidación intracelular de un donante de electrones, con la reducción extracelular de un aceptor de electrones, este hallazgo marcó el inicio de las tecnologías electroquímicas microbianas, siendo el modelo de bacteria electroactiva el *G. Sulfurreducens* (Estevez-Canales, 2016). Además, esta bacteria es un bacilo gram negativo de 2 a 4 por 0.5 μm , inmóvil, no formador de esporas, anaerobio estricto, y quimioorganotrófico (Bueno, Rodríguez y Rodríguez, 2016).

ESTUDIOS REALIZADOS EN CCM CON *Geobacter Sulfurreducens*

Las bacterias del género *Geobacter* pueden oxidar completamente compuestos sencillos como son: el acetato, la glucosa, soluciones con alto contenido de materia orgánica como los residuos vegetales o las aguas residuales (Romero et al., 2012).

A continuación, se describen algunos estudios realizados en CCM utilizando el *G. Sulfurreducens*:

El primer estudio de las *G. Sulfurreducens* en CCM unidas a electrodos lo realizaron Bond y Lovley (2003) en su investigación titulado “Producción de electricidad por *Geobacter sulfurreducens* unida a los electrodos”, donde trataron de comprender el proceso de transferencia de electrones para la producción de energía, por lo cual se inoculó el *G. Sulfurreducens* en cámaras que contaban con unos electrodos de grafito, que sirvió como el único receptor de electrones y el acetato o hidrógeno fue el donante de electrones. Los microorganismos unidos al electrodo oxidaron completamente el acetato, produciendo 65 mA/m² de corriente eléctrica sobre la superficie del electrodo en las CCM.

Años más tarde, Nevin et al. (2008) con su investigación titulada “Potencia de salida y eficiencias columbicas de biopelículas de *Geobacter sulfurreducens* comparables a celdas de combustible microbianas comunitarias mixtas”, registró que al usar telas de carbón como electrodo tanto en el ánodo como en el cátodo dio como resultado una corriente eléctrica y potencia de 4.56 A/m² y 1.88 W/m² respectivamente; pero al cambiar el electrodo de la cámara anódica a barras de grafito la densidad de corriente fue 3.10 A/m² algo menor que con la tela de carbón.

Además, Yi et al. (2009) en su investigación titulado “Selección de una variante de *Geobacter sulfurreducens* con capacidad mejorada para la producción actual en celdas de combustible microbianas”; evaluó la posibilidad de adaptar este organismo para producir densidades de corriente aún mayores. La metodología consistió en obtener una cepa mejorada a partir de un inóculo de la cepa de tipo salvaje de *G. Sulfurreducens* (DL-1); la cepa mejorada llamada KN400 se recuperó al quinto mes de su crecimiento en el electrodo. Luego cada cepa fue sometida a las CCM, notándose claramente que la cepa KN400 fue mucho más efectivo en la producción de electricidad que la cepa DL-1, registrándose 7.6 A/m² y una potencia de 3.9 W/m² para la cepa KN400, mientras que para la cepa DL-1 registró una corriente de 1.4 A/m² y una potencia de 0.5 W/m².

El desarrollo del estudio de las CCM con *G. Sulfurreducens* ha ido mejorando y en la actualidad encontramos estudios como las de Ren et al. (2019) en su investigación titulada “Tuning *Geobacter sulfurreducens* biofilm con polielectrolito conjugado para un mayor

rendimiento en el sistema bioelectroquímico”; consistió en mejorar la producción de electricidad por lo cual se agregó un polielectrolito conjugado (CPE-K) en la celda anódica, el cual fue el medio de crecimiento para conformar la biopelícula anódica con las células *Geobacter sulfurreducens*; registrando una densidad de corriente máxima de hasta 12.3 ± 0.5 A/m² y de los controles fue 6.2 ± 0.7 A/m². Estos resultados demostraron por primera vez que los polielectrolitos conjugados podrían usarse para el aumento de la biopelícula de *G. sulfurreducens* para lograr una alta producción de electricidad mediante el ajuste de la biopelícula anódica en CCM.

Conforme los resultados de la revisión bibliográfica se deducen que los electrodos han disminuido su tamaño, la densidad de corriente ha aumentado hasta 200 veces su producción en aproximadamente 20 años de investigación.

Tabla 1.

Resultados de los estudios realizados con Geobacter Sulfurreducens mencionados anteriormente.

Año	Densidad de corriente (A/m ²)	Tipo de electrodo	Tipo de CCM
2003	0.065	Grafito Sólido	Doble cámara, tipo H
2008	4.56	Tela de carbón	Cátodo de aire
2009	7.6	Grafito sólido y vidrio	Cátodo de aire
2019	12.3	¿?	Una sola cámara

A partir de la Tabla 1 y con la ayuda del Software R Studio 3.6.2, se realizó un diagrama de barras con los datos de densidad de corriente (A/m²) de las revisiones bibliográficas, donde se puede ver que desde el año 2003 hasta el año 2019 la producción de corriente por m² ha ido incrementando en comparación a sus inicios, como se observa en la Figura 2.

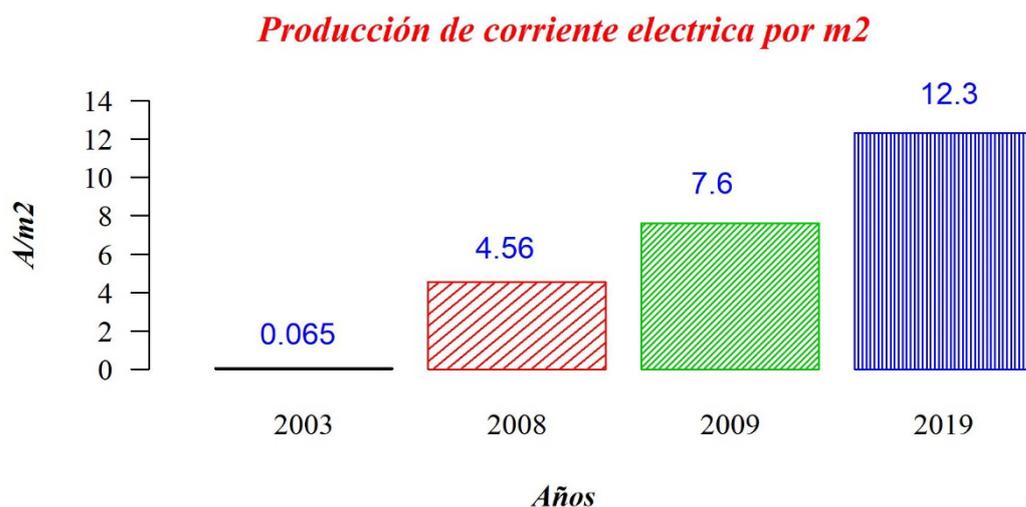


Figura 2. Registro de la producción de corriente eléctrica por m² desde el año 2003 hasta el año 2019 utilizando *G. Sulfurreducens*.

DISEÑO DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (CCMs).

A lo largo del tiempo se han propuesto una variedad de diseños para la construcción de una CCM. Muchas de las modificaciones de los modelos existentes se han llevado a cabo en la última década para aumentar las densidades de potencia, y para mantener una producción de corriente constante; por lo cual para el presente diseño de las CCM de doble cámara tipo H, se tomó como referencia el modelo realizado por Bermudez y Bernal (2018), y se modificó el tamaño de la membrana de intercambio protónico ya que al estar más cerca la cámara anódica de la catódica, el paso de los protones generados en el ánodo se realizara de manera más rápida al cátodo, produciéndose mayor reducción del oxígeno y como consecuencia mayor producción de energía eléctrica. El diseño de CCM, se realizó en el Software AutoCAD 2018.

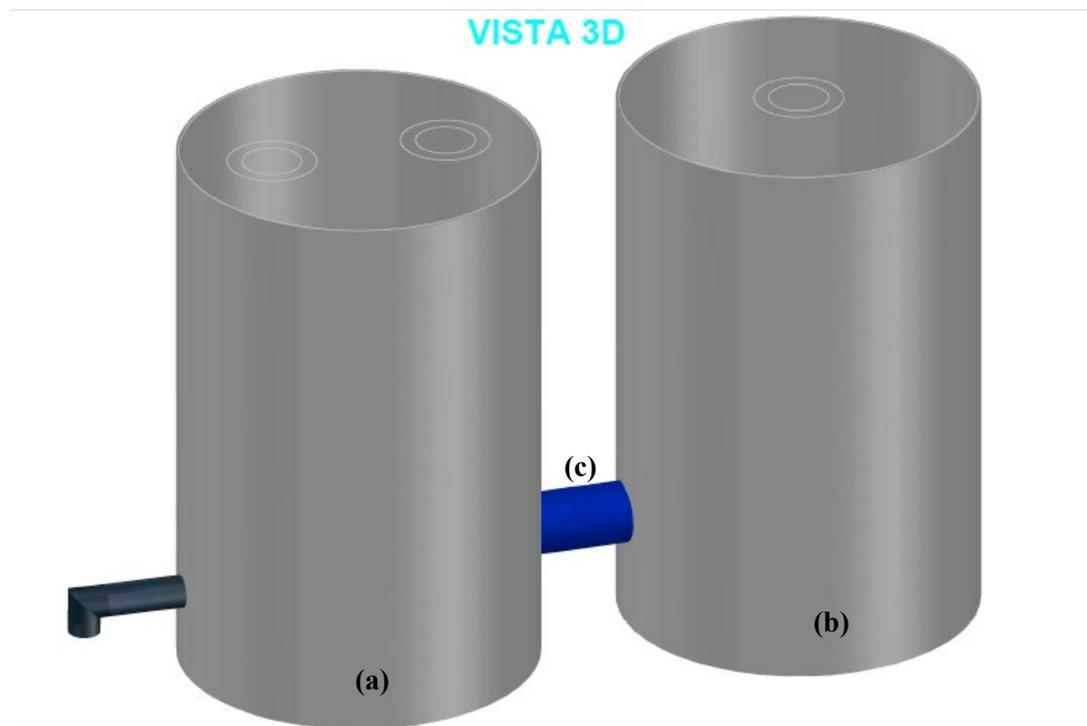


Figura 3. Vista 3D del diseño realizado de las celdas de combustible microbiano (CCM), se puede observar la celda anaerobia (a) y la celda aerobia (b) y la membrana de intercambio protónico (c).

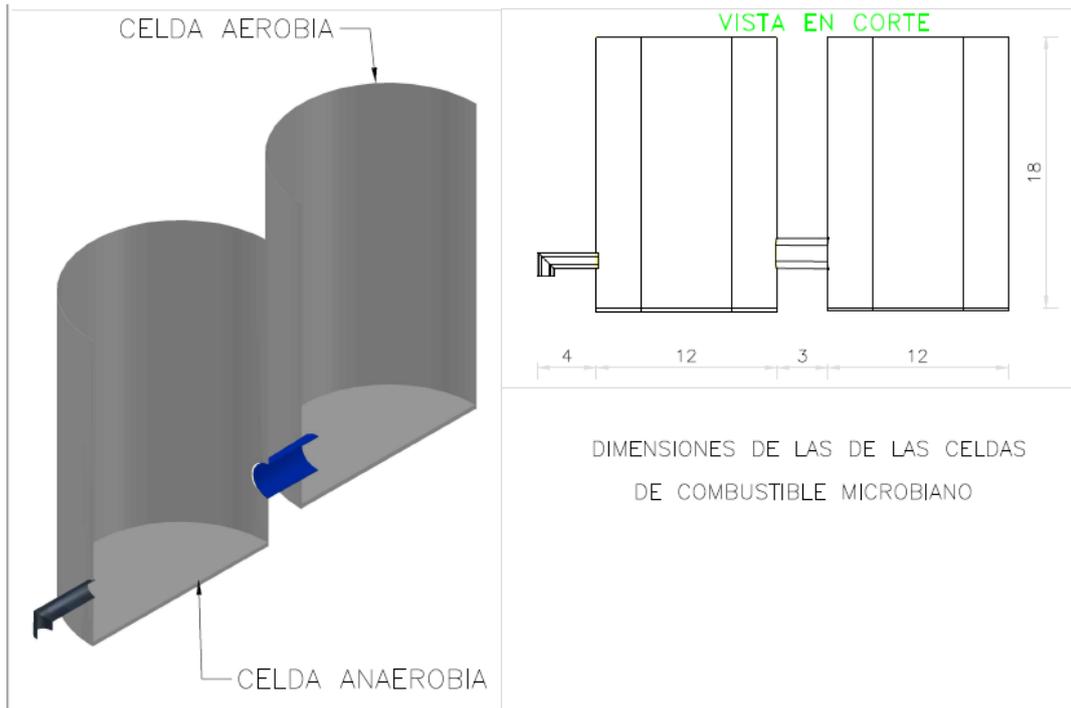


Figura 4. Vista en corte de las CCM y dimensiones. Vista longitudinal 3D de las CCM.

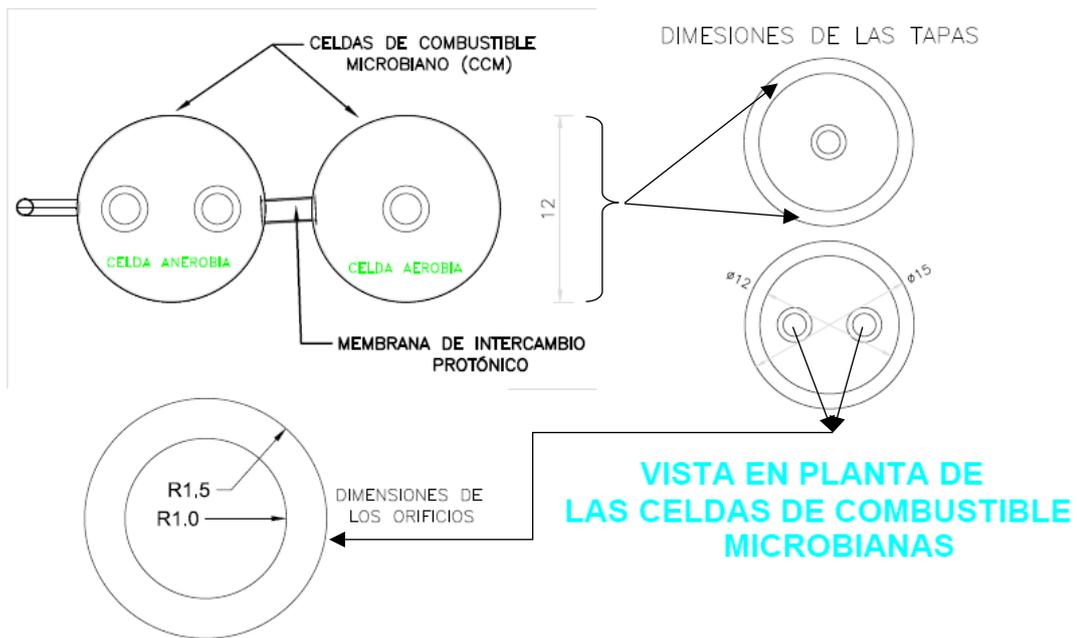


Figura 5. Vista en planta 2D de las CCM, dimensiones de las tapas y orificios.

MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO

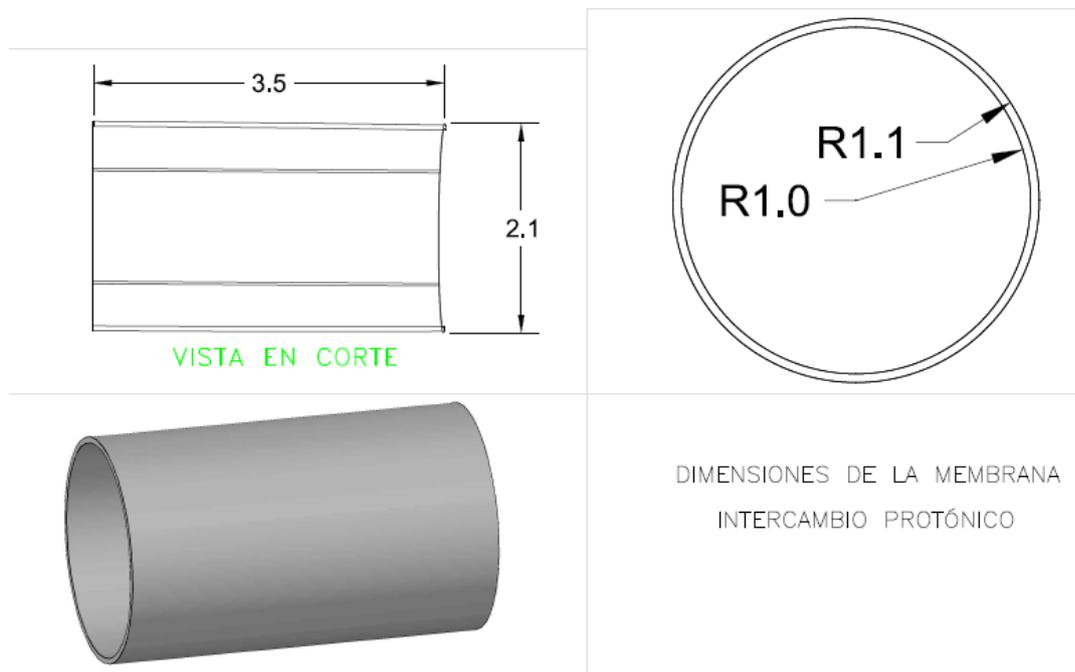


Figura 6. Vista en corte 2D de la Membrana de Intercambio Protónico y dimensiones. Vista 3D de

CONCLUSIONES

Las celdas de combustible microbianas más utilizadas para la producción de energía eléctrica son las de dos cámaras (tipo H) debido a que este tipo de celdas son las más empleadas para realizar estudios a escala laboratorio y permite tener un mayor control sobre las cámaras que se encuentra en condiciones anaerobias, además, permite que se realicen estudios en cuanto a las dimensiones y áreas de contacto de las partes que la componen.

En base a los diferentes estudios revisados se diseñó un prototipo de celdas de combustible microbiana de dos cámaras (tipo H) unidas mediante una membrana de intercambio protónico, para la generación de energía eléctrica de manera sostenible.

Referencias

- Avendaño, J., & Castillo, L. (2018). Diseño y monitoreo en tiempo real de un sistema de generación de voltaje mediante celdas de combustible microbianas (Microbial Fuel Cells (MFC)) (Universidad Magdalena-Colombia). Retrieved from <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/bitstream/123456789/4412/1/IE-00072.pdf>
- Bermudez, M., & Bernal, E. (2018). Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(4), 2046–2069. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2457491>
- Bond, D., & Lovley, D. (2003). Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(3), 1548–1555. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.3.1548>
- Borjas, L. (2016). Physiological and Operation Strategies for Optimizing *Geobacter* – based Electrochemical Systems. 274. Retrieved from <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/26339>
- Bueno, M., Rodríguez, L., & Rodríguez, P. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. Retrieved from <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/7282/8748>
- Castro, J. (2019). Búsqueda de bacterias electrogénicas en celdas de combustible microbiano a partir de miel de café. Retrieved from <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/6438>
- Cevallos, M. (2019). Evaluación de la Bacteria *Geobacter* sp. en el Tratamiento del Agua Residual del Camal de Otavalo. Retrieved from [http://190.15.137.77/bitstream/11010/571/1/1_TESIS “Evaluación de la Bacteria *Geobacter* sp. en el Tratamiento del Agua Residual del Camal d.pdf](http://190.15.137.77/bitstream/11010/571/1/1_TESIS%20%Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Bacteria%20Geobacter%20sp.%20en%20el%20Tratamiento%20del%20Agua%20Residual%20del%20Camal%20d.pdf)
- Esteve-Núñez, A. (2008). Bacterias productoras de electricidad. *Temas de Actualidad*, 45, 34–39. Retrieved from <http://crinoidea.semimicrobiologia.org/pdf/actualidad/45/Geobacter.pdf>
- Estevez-Canales, M. R. (2016). Novel bioelectrochemical approaches for exploring extracellular electron transfer in *Geobacter sulfurreducens*. Retrieved from [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/26378/Thesis Marta Rosa Estevez Canales.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/26378/Thesis%20Marta%20Rosa%20Estevez%20Canales.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Góngora, A., Ochoa, J., Sosa, M., & Vázquez, E. (2017). Energía : celdas de combustible microbianas. Retrieved from <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/55/89>
- Jibaja, S., Oyola, V., Berastain, A., Ramos, D., Roncal, E., Medina, J. C., ... Hurtado, J. (2019). Producción de electricidad empleando *Acidithiobacillus Ferroxidans* a partir de iones tiosulfato y férrico. 85(1). Retrieved from <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v85n1/a02v85n1.pdf>
- Jiménez, M., Garibay, C., & Borja, M. (2018). Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la eficiencia de una celda de combustible microbiana. 34(2), 331–345. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.13>
- Lovley, D. R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N. S., Shrestha, P. M., Flanagan, K. A., ... Nevin, K. P. (2011). *Geobacter*: the microbe electric’s physiology, ecology, and practical applications. *Advances in Microbial Physiology*, 59, 1–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5>
- Nava, P., & Castillo, M. (2018). Celdas de combustible microbianas como alternativa para

- atender los retos de la sostenibilidad: Agua, energía y contaminación. *Revista de Ingeniería Innovativa*, 2(5), 18–34. Retrieved from http://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Innovativa/vol2num5/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V2_N5_3.pdf
- Nevin, K. P., Richter, H., Covalla, S. F., Johnson, J. P., Woodard, T. L., Orloff, A. L., ... Lovley, D. R. (2008). Power output and coulombic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells. *Environmental Microbiology*, 10(10), 2505–2514. <https://doi.org/doi:10.1111/j.1462-2920.2008.01675.x>
- Pandit, S., & Das, D. (2018). Principles of Microbial Fuel Cell for the Power Generation. (January). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5>
- Pineda, A., & Rosas, M. (2016). Estado Del Arte En Celdas De Combustible Microbianas (Ccm) Para Producción De Bioenergía. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Promigas. (2018). Informe del sector gas natural en Perú 2018. Retrieved from http://www.promigas.com/Es/Noticias/Documents/Informe-Sector-Gas-Peru/ISGNPERU2018_181018_DIGITAL.pdf
- Ren, L., McCuskey, S. R., Moreland, A., Bazan, G. C., & Nguyen, T.-Q. (2019). Tuning *Geobacter sulfurreducens* biofilm with conjugated polyelectrolyte for increased performance in bioelectrochemical system. *Biosensors and Bioelectronics*, 144, 111630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111630>
- 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. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Ríos, S. (2016). Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, Estación Experimental Tunshi ESPOCH. In *Facultad de Ciencias*. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5662/1/236T0214.pdf>
- Rodríguez, M. (2017). Obtención del compuesto Carbón/ZnO/SnO₂ y su evaluación como cátodo en una celda de combustible microbiana. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/14456/1/1080252195.pdf>
- Romero, A. A., Vásquez, J. A., & Lugo, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Revista Tecnura*, 16(32), 117. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
- Serment, J., Lara, E., Becerril, S., & Ramírez, N. (2017). Detección y aislamiento de microorganismos exoelectrógenos a partir de lodos del río Lerma, Estado de México, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4), 617–628. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.04.06>
- Valencia-Pacho, M. (2018). Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales de camal. Retrieved from http://181.176.163.136/bitstream/handle/UNAP/7944/Valencia_Pacho_Marleni_Yovanna.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vargas, B. A., Álvarez, M. T., Ghezzi, F., & Ticona, A. (2018). *Saccharomyces Cerevisiae* como biocatalizador en celdas de combustible microbianas con ferricianuro de potasio. *Revista Boliviana de Física*, 33(33), 21–26. Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-

38232018000200004

- Yi, H., Nevin, K., Kim, B.-C., Franks, A., Klimes, A., Tender, L., & Lovley, D. (2009). Selection of a variant of *Geobacter sulfurreducens* with enhanced capacity for current production in microbial fuel cells. *Biosensors & Bioelectronics*, *24*, 3498–3503. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.05.004>
- Zolezzi, A. (2017). AMP Acta Médica Peruana Salud y medio ambiente en el Perú actual Health and environment in Peru: Current situation. *Acta Med Peru*, *34*(2), 79–81. Retrieved from <http://www.scielo.org.pe/pdf/amp/v34n2/a01v34n2.pdf>