

**DOI:** 10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.161-173

**URL:** <http://recimundo.com/index.php/es/article/view/884>

**EDITORIAL:** Saberes del Conocimiento

**REVISTA:** RECIMUNDO

**ISSN:** 2588-073X

**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** Artículo de Revisión

**CÓDIGO UNESCO:** 3303 Ingeniería y Tecnología Químicas

**PAGINAS:** 161-173







## Microorganismos como fuente de energía alternativa

Microorganisms as a source of alternative energy

Microorganismos como fonte alternativa de energia

Sany Sofia Robledo Gáneas<sup>1</sup>; Stalin Fabián Martínez Mora<sup>2</sup>; Nelly Cecilia Navarrete Freire<sup>3</sup>;  
María Fernanda Vélez León<sup>4</sup>

**RECIBIDO:** 10/07/2020 **ACEPTADO:** 26/08/2020 **PUBLICADO:** 30/10/2020

1. Diploma Superior en Gestión de Desarrollo de los servicios de Salud; Magister en Gerencia de Servicios de Salud; Licenciada en Laboratorio Clínico; Tecnólogo Médico en Laboratorio Clínico; Universidad Técnica de Babahoyo; Babahoyo, Ecuador; srobledo@utb.edu.ec;  <https://orcid.org/0000-0002-0102-2557>
2. Magister en Microbiología Mención Biomédica; Químico y Farmacéutico; Docente en la Universidad Técnica de Babahoyo; Babahoyo, Ecuador; smartinez@utb@edu.ec;  <https://orcid.org/0000-0002-8547-5288>
3. Magister en Microbiología Mención Biomédica, Química y Farmacéutico; Universidad Técnica de Babahoyo; Babahoyo, Ecuador; nenafrei19@gmail.com;  <https://orcid.org/0000-0002-6142-841X>
4. Magister en Microbiología Avanzada; Mención industrial; Química Farmacéutica; Universidad Técnica de Babahoyo; Babahoyo, Ecuador; mafafita34@hotmail.com;  <https://orcid.org/0000-0002-4184-3413>

### CORRESPONDENCIA

Diego Rafael Mosquera Hallo  
dyego.mh@hotmail.com

Quito, Ecuador

## RESUMEN

Las fuentes de energía alternativas ampliamente conocidas son, en general, las fuentes de energía renovables como las células solares, las pilas de combustible y la energía eólica. En este momento, varios tipos de pilas de combustible basadas en hidrógeno y metanol funcionan de forma adecuada y ya existen aplicaciones para, por ejemplo, ordenadores portátiles. Sin embargo, cabe preguntarse si esta generación de energía es realmente sostenible. Además, es posible que al cliente no le guste transportar gas hidrógeno (incluso capturado dentro de una matriz de hidruro metálico) o metanol. Pero las pilas de combustible microbianas pueden funcionar en una gran variedad de sustratos que están fácilmente disponibles, incluso en cualquier supermercado. Los sustratos como el azúcar natural y el almidón son fáciles de almacenar, contienen más energía que cualquier otro tipo de alimento por unidad de volumen y son fáciles de dosificar, además, tienen una imagen más "ecológica" que, por ejemplo, el metanol. Adicionalmente, se pueden desarrollar celdas de combustible microbiana (CCM) que sean respetuosos con el medio ambiente en términos de composición del material. Cuando los microorganismos funcionan como biocatalizadores que motivan la degradación de materiales orgánicos para producir electrones, que viajan a través de un circuito eléctrico, la celda de combustible se denomina celda de combustible microbiana. Este artículo cubre una introducción a los CCM, el estado actual de los CCM y las amplias aplicaciones de la tecnología CCM.

**Palabras clave:** Celdas de combustible microbianas, Celdas de combustible de membrana de electrolito de polímero, Sustratos, Tratamiento de aguas residuales.

## ABSTRACT

The widely known alternative energy sources are, in general, renewable energy sources such as solar cells, fuel cells and wind energy. At this time, various types of hydrogen and methanol based fuel cells are working well and there are already applications for, for example, notebook computers. However, one wonders if this power generation is really sustainable. Also, the customer may not like to transport hydrogen gas (even captured within a metal hydride matrix) or methanol. But microbial fuel cells can work on a wide variety of substrates that are readily available, even in any supermarket. Substrates such as natural sugar and starch are easy to store, contain more energy than any other type of food per unit of volume and are easy to dose, in addition, they have a more "ecological" image than, for example, methanol. Additionally, microbial fuel cell (CCM) can be developed that are environmentally friendly in terms of material composition. When microorganisms function as biocatalysts that motivate the degradation of organic materials to produce electrons, which travel through an electrical circuit, the fuel cell is called a microbial fuel cell. This article covers an introduction to CCMs, the current state of CCMs, and the broad applications of CCM technology.

**Keywords:** Microbial Fuel Cells, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Substrates, Wastewater Treatment.

## RESUMO

As fontes alternativas de energia mais conhecidas são, em geral, fontes renováveis de energia como células solares, células a combustível e energia eólica. Atualmente, vários tipos de células a combustível à base de hidrogênio e metanol estão funcionando bem e já existem aplicações para, por exemplo, notebooks. Porém, questiona-se se essa geração de energia é realmente sustentável. Além disso, o cliente pode não gostar de transportar gás hidrogênio (mesmo capturado em uma matriz de hidreto de metal) ou metanol. Mas as células a combustível microbianas podem funcionar em uma ampla variedade de substratos que estão prontamente disponíveis, mesmo em qualquer supermercado. Substratos como açúcar natural e amido são fáceis de armazenar, contêm mais energia do que qualquer outro tipo de alimento por unidade de volume e são fáceis de dosar, além de terem uma imagem mais "ecológica" do que, por exemplo, o metanol. Além disso, podem ser desenvolvidas células a combustível microbiana (CCM) que são ambientalmente amigáveis em termos de composição de material. Quando os microrganismos funcionam como biocatalisadores que motivam a degradação de materiais orgânicos para produzir elétrons, que viajam através de um circuito elétrico, a célula a combustível é chamada de célula a combustível microbiana. Este artigo cobre uma introdução aos CCMs, o estado atual dos CCMs e as amplas aplicações da tecnologia CCM.

**Palavras-chave:** Células de combustível microbianas, células de combustível de membrana de eletrólito de polímero, substratos, tratamento de águas residuais.

## Introducción

Las fuentes de energía alternativas se conocen como las fuentes de energía renovables entre las que se destacan las células solares, las pilas de combustible y la energía eólica. “Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química almacenada en un combustible directamente en energía eléctrica” (Ruiz & Marrero, 2006).

Los autores Ruiz & Marrero, (2006) exponen que “las pilas de combustible tienen varias ventajas en comparación con las fuentes de energía convencionales, como los motores de combustión interna o las baterías”. Los beneficios incluyen: mayor eficiencia en comparación con los motores diésel o de gas, su funcionamiento está libre de ruido y contaminación por CO<sub>2</sub> y no necesita combustibles convencionales como el petróleo o el gas y, por lo tanto, puede reducir la dependencia económica de los países productores de petróleo y el combustible principal (H<sub>2</sub>) puede ser producido a partir de la fuente de agua natural, etc.

Las baterías convencionales tienen varios inconvenientes:

- deben cargarse durante varias horas para poder utilizarse;
- son perjudiciales para el medio ambiente debido al contenido de metales pesados;
- se necesita electricidad para encenderlos.

Por lo tanto, se desarrollan diferentes tipos de pilas de combustible de la siguiente manera:

- pilas de combustible alcalinas;
- pilas de combustible de membrana de intercambio de protones;
- pilas de combustible de metanol directo;
- pilas de combustible de ácido fosfórico;
- pilas de combustible de carbonato fundido;

dido;

- pilas de combustible de óxido sólido.

La pila de combustible alcalina son una de las tecnologías de pila de combustible más desarrolladas. “Utilizan electrolitos alcalinos como hidróxido de potasio en agua y funcionan a 70 ° C. Emplean catalizadores de metales no nobles más baratos, como el níquel y la plata” (Wagner, Schulze, & Gulzow, 2004). Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, también conocidas como pilas de combustible de membrana de electrolito polimérico (PEM), son un tipo de pila de combustible que se está desarrollando para aplicaciones de transporte.

Emplean una membrana de polímero ácido, a base de agua, conductora de protones como electrolito y operan a temperaturas relativamente bajas. Las pilas de combustible de metanol directo son una subcategoría de las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, siendo el combustible el metanol. Utiliza una membrana de polímero como electrolito y funciona entre 60 ° C y 130 ° C (Hacquard, 2005).

Las pilas de combustible de ácido fosfórico “emplean ácido fosfórico líquido puro o altamente concentrado como electrolito. Siendo el catalizador platino finamente disperso, operan entre 150 ° C y 220 ° C” (Georgi & Leccese, 2013). Las pilas de combustible de carbonato fundido representan una tecnología de pilas de combustible de alta temperatura.

Emplean sal de carbonato fundido como electrolito y no requieren un catalizador metálico. Funcionan a unos 650 ° C. Las pilas de combustible de óxido sólido son otro tipo de pilas de combustible de alta temperatura cuya temperatura de funcionamiento oscila entre 800 ° C y 1000 ° C. Utilizan una cerámica sólida como el óxido de circonio estabilizado como electrolito y no necesitan un catalizador metálico. Son ampliamente

utilizados para la generación de energía estacionaria. (Georgi & Leccese, 2013).

La celda de combustible microbiana convencional “es un sistema de dos cámaras, que consta de cámaras de ánodo y cátodo que están separadas por un electrolito sólido o líquido que transmite partículas cargadas eléctricamente a través de ellas” (He, Zhou, & Yang, 2014).

#### *Adicionalmente*

En el extremo del ánodo, el combustible se oxida y libera electrones. En el cátodo, se produce una reducción de oxígeno. El electrolito conduce iones de un electrodo a otro, dentro de una celda de combustible. El catalizador acelera una reacción química. El reformador extrae hidrógeno puro de los hidrocarburos. (He, Zhou, & Yang, 2014).

Las pilas de combustible microbianas se han convertido en una alternativa prometedora para la generación de electricidad, el cultivo de biomasa y el tratamiento de aguas residuales. “Si las celdas de combustible microbianas utilizan energía solar para generar electricidad, entonces se denominan celdas de combustible microbianas fotoeléctricas. Si utilizan algas fotosintéticas para producir electricidad, entonces se denominan células de combustible microbianas de algas fotosintéticas” (He, Zhou, & Yang, 2014).

Se cree que las pilas de combustible microbianas sirven como una alternativa tecnológica viable al tratamiento convencional de aguas residuales. Pueden recolectar electricidad de la energía disponible en las aguas residuales orgánicas, Rabaey, (2003) afirma.

Microorganismos como *Chlorella vulgaris*, *Leptothrix discophora*, *Klebsiella pneumonia*, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhodospirillum rubrum*, *G. metallireducens*, *D. desulfuricans* y otras

bacterias aeróbicas y anaeróbicas se han utilizado hasta ahora en pilas de combustible microbianas. También se cree que pocos otros microorganismos, como las cianobacterias y algunas microalgas, desempeñan funciones notables si se emplean en pilas de combustible microbianas. Improvisar el funcionamiento de estas células para dar rendimientos exponenciales será el futuro esperado del campo. (p.24)

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química almacenada directamente en energía eléctrica. Se consideran altamente fiables debido a su alta eficiencia y emisión baja o nula. Cuando los microorganismos funcionan como biocatalizadores que motivan la degradación de materiales orgánicos para producir electrones, que viajan a través de un circuito eléctrico, la pila de combustible se denomina pila de combustible microbiana.

#### **Metodología**

Para el desarrollo de este proceso investigativo, se plantea como metodología la encaminada hacia una orientación científica particular que se encuentra determinada por la necesidad de indagar en forma precisa y coherente una situación, en tal sentido Davila, (2015) define la metodología “como aquellos pasos anteriores que son seleccionados por el investigador para lograr resultados favorables que le ayuden a plantear nuevas ideas” (p.66)

Lo citado por el autor, lleva a entender que el desarrollo de la acción investigativa busca simplemente coordinar acciones enmarcadas en una revisión bibliográfica con el fin de complementar ideas previas relacionadas Microorganismos como fuente de energía alternativa a través de una revisión de literatura, para así finalmente elaborar un cuerpo de consideraciones generales que ayuden a ampliar el interés propuesto.

## **Tipo de Investigación**

Dentro de toda práctica investigativa, se precisan acciones de carácter metodológico mediante las cuales se logra conocer y proyectar los eventos posibles que la determinan. En este sentido, la presente investigación corresponde al tipo documental, definido por Castro (2016), “se ocupa del estudio de problemas planteados a nivel teórico, la información requerida para abordarlos se encuentra básicamente en materiales impresos, audiovisuales y / o electrónicos”. (p.41).

En consideración a esta definición, la orientación metodológica incluye la oportunidad de cumplir con una serie de actividades inherentes a la revisión y lectura de diversos documentos, donde se encuentran ideas explícitas relacionadas con los tópicos encargados de identificar una característica inmersa en el estudio. Por lo tanto, se realizaron continuas interpretaciones con el claro propósito de revisar aquellas apreciaciones propuestas por diferentes investigadores en relación al tema de interés, para luego dar la respectiva argumentación a los planteamientos, en función a las necesidades encontradas en la investigación, apoyados en las herramientas tecnológicas para la búsqueda de trabajos con valor científico disponibles en la web que tenían conexión con el objetivo principal de la investigación.

## **Fuentes Documentales**

El análisis correspondiente a las características que predomina en el tema seleccionado, llevan a incluir diferentes fuentes documentales encargadas de darle el respectivo valor científico y en ese sentido cumplir con la valoración de los hechos a fin de generar nuevos criterios que sirven de referencia a otros procesos investigativos. Para Castro,(2016) las fuentes documentales incorporadas en la investigación documental o bibliográfica, “representa la suma de materiales sistemáticos que son revisados

en forma rigurosa y profunda para llegar a un análisis del fenómeno” (p.41). Por lo tanto, se procedió a cumplir con la lectura previa determinada para encontrar aquellos aspectos estrechamente vinculados con el tema, con el fin de explicar mediante un desarrollo las respectivas apreciaciones generales de importancia.

## **Técnicas para la Recolección de la Información**

La conducción de la investigación para ser realizada en función a las particularidades que determinan a los estudios documentales, tiene como fin el desarrollo de un conjunto de acciones encargadas de llevar a la selección de técnicas estrechamente vinculadas con las características del estudio. Bolívar, (2015), refiere, que es “una técnica particular para aportar ayuda a los procedimientos de selección de las ideas primarias y secundarias”. (p.71).

Tal como lo expresa, Bolívar, (2015) “Las técnicas documentales proporcionan las herramientas esenciales y determinantes para responder a los objetivos formulados y llegar a resultados efectivos” (p. 58). Es decir, para responder con eficiencia a las necesidades investigativas, se introdujeron como técnica de recolección el método inductivo, que hizo posible llevar a cabo una valoración de los hechos de forma particular para llegar a la explicación desde una visión general. El autor Bolívar, (2015) también expresa que las técnicas de procesamiento de datos en los estudios documentales “son las encargadas de ofrecer al investigador la visión o pasos que deben cumplir durante su ejercicio, cada una de ellas debe estar en correspondencia con el nivel a emplear” (p. 123). Esto indica, que para llevar a cabo el procesamiento de los datos obtenidos una vez aplicadas las técnicas seleccionadas, tales como: fichas de resumen, textual, registros descriptivos entre otros, los mismos se deben ajustar al nivel que ha sido seleccionado.



## Resultados

### Componentes de una celda de combustible

La celda de combustible microbiana convencional “es un sistema de dos cámaras, que consta de cámaras de ánodo y cátodo que están separadas por un electrolito sólido o líquido que transmite partículas cargadas eléctricamente a través de ellas” (Tender, Reimers, & Stecher, 2002). En el extremo del ánodo, el combustible se oxida y libera electrones. En el cátodo, se produce una reducción de oxígeno. El electrolito conduce iones de un electrodo a otro, dentro de una celda de combustible. El catalizador acelera una reacción química. El reformador extrae hidrógeno puro de los hidrocarburos.

### Tipos de células de combustible

#### *Pilas de combustible alcalinas*

La pila de combustible alcalina (PCA), también conocida como pila de combustible Bacon por su inventor británico, es una de las tecnologías de pila de combustible más desarrolladas, Georgi & Leccese, (2013) expone que:

Los PCA utilizan electrolitos alcalinos como el hidróxido de potasio en el agua. Se sabe que son las pilas de combustible de mejor rendimiento de las pilas de combustible de hidrógeno-oxígeno convencionales que funcionan a temperaturas inferiores a 200 ° C. Las temperaturas de funcionamiento típicas rondan los 70 ° C. Emplean catalizadores de metales no nobles más baratos, como níquel y plata y pueden ofrecer una alta eficiencia eléctrica. (p. 34)

Los PCA son ventajosos sobre otras celdas de combustible que utilizan catalizadores de metales preciosos, como la Descomposición Catalítica de Metano (DCM), de las siguientes maneras:

1. El problema de la lenta cinética del electrodo que encuentran las otras pilas no se encuentra en las pilas de combustible alcalinas porque es un hecho bien establecido que la cinética del electrodo de reducción de oxígeno se mejora en un medio alcalino.
2. Utilizan metales no preciosos como catalizadores, como catalizadores de plata, catalizadores de níquel y óxidos de tipo perovskita, que son menos propensos al cruce de metanol.
3. El envenenamiento por CO del catalizador de platino a bajas temperaturas es otro problema que encuentran otras pilas de combustible, pero no las pilas de combustible alcalinas.

El único problema con estas pilas de combustible es la carbonatación progresiva de la solución alcalina, debido a la liberación de dióxido de carbono del producto del combustible. “Esto reduce el pH de la solución alcalina, disminuyendo así la reactividad para la electro oxidación del metanol en última instancia, sin embargo, se van a establecer investigaciones en esta área de pilas de combustible alcalinas que podrían rectificar este problema de carbonatación”. (Georgi & Leccese, 2013)

#### *Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones*

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, también conocidas como pilas de combustible de membrana de electrolito polimérico, son un tipo de pila de combustible que se está desarrollando para aplicaciones de transporte, así como para aplicaciones de pilas de combustible de oficina.

La celda PEM utiliza una membrana de polímero ácido, a base de agua, conductora de protones como electrolito. La membrana polimérica utilizada es impermeable a los gases pero conduce protones. Entre las membranas de las células de combustible

de membrana de intercambio de protones alimentadas con hidrógeno, las membranas a base de ácido perfluoro-sulfónico, en su mayoría Nafion de DuPont, muestran un dominio completo sobre otras membranas comercializadas (Neburchilov, Martin, & Wang, 2007).

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones funcionan a temperaturas relativamente bajas (por debajo de 100 ° C). Los desafíos enfrentados al operar estas celdas a baja temperatura incluyen impurezas de combustible, tolerancia al CO y rechazo de calor. Sus deficiencias podrían superarse en un funcionamiento a altas temperaturas. La temperatura alta puede ser de hasta 200 ° C. Pero el problema principal al operar a altas temperaturas es que la humedad relativa es directamente proporcional a la conductividad de la membrana de Nafion de las células.

Por lo tanto, siempre que hay una caída en la humedad relativa de la celda, la conductividad de la membrana de Nafion también desciende. Las células no pueden producir una conductividad de membrana alta en un rango de ( $> 0,1 \text{ cm}^{-1}$ ) a menos que un subsistema de humidificación externo funcione con el sistema de pila de combustible. La salida eléctrica es generalmente variable y son ideales para vehículos. Se ha informado que muestran un 50% más de eficiencia de conversión de combustible que el motor de un automóvil. En condiciones favorables, su eficiencia puede ser de casi el 60% cuando el motor de un automóvil ha alcanzado solo el 30%. (Neburchilov, Martin, & Wang, 2007).

Sin embargo, el autor expresa que Vishnyakov, (2016), "existen ciertos factores que afectan el rendimiento de los PEM-FC". Son los siguientes:

1. Presiones parciales de reactivos y variaciones de presión a través de la membrana, mientras la celda está funcionan-

do.

2. Suministro de hidrógeno en el ánodo.
3. Falta de oxígeno en el cátodo.
4. Conductividad de la membrana deshidratada.
5. Por otro lado, la presencia de demasiada agua en los canales de la placa posterior también reduce la eficiencia de la celda.
6. Hidrofobicidad de la superficie de la membrana.
7. Deshidratación en el ánodo.
8. Falta de asistencia para difundir el agua producida en el cátodo.

Teniendo en cuenta los factores antes mencionados, se podrían superar las deficiencias actuales de estas pilas de combustible y se podría argumentar que son las más sencillas y altamente eficientes.

### *Pilas de combustible de metanol directo*

Las pilas de combustible de metanol directo son una subcategoría de las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, el combustible es el metanol. Se considera ventajoso sobre los otros tipos de celdas por el uso de combustible líquido (metanol), fácil repostaje, bajo costo y facilidad en el transporte del metanol.

Además, el metanol es denso en energía, pero razonablemente estable en todas las condiciones ambientales. Sin embargo, el metanol es muy volátil y tóxico, lo que puede plantear problemas graves cuando se utiliza en dispositivos electrónicos DCM portátiles.

Aparte de esto, el envenenamiento por CO de los catalizadores de platino y el cruce de metanol son los otros problemas importantes con DCM. Se están llevando a cabo investigaciones sobre la electro oxidación, con alcoholes polihídricos en soluciones alcalinas utilizando electrodo de platino y se ha encontrado que el etilenglicol muestra la reactividad más alta entre los alcoh-

les examinados en soluciones de KOH y  $K_2CO_3$ . También se cree que el etilenglicol soluciona el problema de la carbonatación, debido a la liberación de  $CO_2$  del producto del combustible. Es mucho menos tóxico y volátil que el metanol y se supone que es más seguro. (Zhang, Ahn, & Logan, 2014)

Los DCM utilizan una membrana de polímero como electrolito como el PECCM. De acuerdo con McGrath, (2014):

Se encuentra que los catalizadores más efectivos son platino-rutenio con soporte de carbono o sin soporte en el ánodo y platino en el cátodo. Operan a temperaturas entre  $60\text{ }^\circ\text{C}$  y  $130\text{ }^\circ\text{C}$  y poseen una densidad de energía teórica de  $6094\text{ W h / kg}$  y una cosecha práctica de  $1000\text{--}3000\text{ W h / kg}$ . Su diseño de celda compacta los hace adecuados para diversas aplicaciones estacionarias y no estacionarias

#### *Pilas de combustible de ácido fosfórico*

Las pilas de combustible de ácido fosfórico desarrolladas a mediados de la década de 1960 recibieron el nombre de su electrolito de trabajo, que es ácido fosfórico líquido altamente concentrado o puro, saturado en una mezcla de carburo de silicio. Usan catalizador de platino finamente disperso sobre carbón. Por lo general, “el ácido fosfórico está rodeado por un par de matrices porosas incrustadas en una matriz cerámica. El ácido fosfórico es un mal conductor y la celda necesita de  $150\text{ }^\circ\text{C}$  a  $220\text{ }^\circ\text{C}$  para funcionar con eficacia” (McGrath, 2014).

Al ser las primeras pilas de combustible comercializadas, se emplean ampliamente en generadores de energía para generar de  $100\text{ kW}$  a  $400\text{ kW}$ . Tienen una amplia gama de aplicaciones en plantas de calefacción central, hospitales, dormitorios, piscinas, edificios de oficinas, lavandería y cocina. Su única desventaja es que no pueden ser compatibles con aplicaciones de vapor térmico a alta temperatura.

El autor McGrath, (2014) también expone que “hay una serie de beneficios en el uso común de pilas de combustible de ácido fosfórico. Son los siguientes:

1. Son beneficiosas para el medio ambiente porque solo emiten agua, que también es muy pura. Se hacen circular dentro del sistema de pila de combustible como refrigerante y la liberación de una pequeña cantidad de agua al medio ambiente no provocará contaminación.
2. Son muy eficientes en combustible con un poder calorífico superior del 36% y un poder calorífico inferior del 40%.
3. Se pueden configurar de tal manera que proporcionen respaldo de energía.
4. Son emisores de bajo ruido que son demasiado bajos en comparación con las tecnologías de combustión tradicionales.
5. Son lo suficientemente flexibles como para ubicarse en áreas urbanas.

Los estudios han demostrado que la adición de pequeñas cantidades de compuestos orgánicos fluorados o compuestos de silicona, que tienen una presión de vapor menor que la del ácido fosfórico, mejora la solubilidad del oxígeno y la difusividad del electrolito. Además, existe el hecho de que la disminución de la polarización del cátodo aumenta la eficiencia de la celda. El uso de electrolito modificado aumenta la eficiencia de la celda al disminuir la polarización catódica.

#### *Pilas de combustible de carbonato fundido*

Las pilas de combustible de carbonato fundido representan una tecnología de pilas de combustible de alta temperatura. “Usan sales de carbonato fundido de metales alcalinos como electrolito. Su ánodo o cátodo está hecho de óxido de níquel u óxido de cobalto u óxido de elemento de tierras raras” (Georgi & Leccese, 2013). “Su temperatura de funcionamiento alcanza los  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . Por eso, en lugar de utilizar un metal precioso



como el platino, se prefiere como catalizador un metal relativamente barato como el níquel” (Rozendal, Hamelers, & Buisman, 2006). Pueden funcionar con combustibles de hidrocarburos como metano, gas natural o gases reformados con carbón. “Dado que se ha informado que su eficiencia es del 45%, que también puede elevarse hasta un 60-70%, podrían considerarse alternativas potenciales para el petróleo” (Georgi & Leccese, 2013).

A pesar de todas sus ventajas, una pila de combustible de carbonato fundido que utiliza un electrolito de carbonato de metal alcalino encuentra los siguientes problemas.

1. La presencia de oxígeno forma grietas en el electrodo, particularmente cuando se usa una placa de níquel poroso sinterizado como cátodo.
2. El tamaño de partícula de la placa de níquel poroso sinterizado tiene efectos de desaceleración en la salida cuando el tamaño de partícula es grande.
3. El uso de una placa de níquel poroso sinterizado en el ánodo disminuye el área superficial del electrodo por el fenómeno de sinterización del níquel y, por lo tanto, disminuye la producción de la celda.

Estas deficiencias podrían superarse encontrando un electrolito alternativo que carezca de las desventajas mencionadas anteriormente y sea muy activo, incluso a altas temperaturas de funcionamiento.

### *Pilas de combustible de óxido sólido*

Las pilas de combustible de óxido sólido son otro tipo de pilas de combustible de alta temperatura, los autores Georgi & Leccese, (2013) expresan:

La temperatura de funcionamiento varía entre 700 ° C y 1000 ° C (pila de combustible de óxido sólido, foco). Utilizan una cerámica sólida como óxido de circonio estabilizado,

iones de oxígeno, un protón o un conductor mixto de iones de oxígeno y protones, que es impermeable a los gases y un aislante electrónico y no necesitan un catalizador metálico. Se informa que su eficiencia es del 60%, teóricamente hasta el 80% y se utiliza ampliamente para la generación de energía estacionaria. (p.45)

Las pilas de combustible de óxido sólido son muy ventajosas sobre otras pilas de combustible en los siguientes aspectos:

1. Tienen un alto rendimiento incluso en un rango de temperatura de 1000 ° C y la actividad del electrodo es extremadamente alta.
2. No requieren el uso de catalizadores costosos como el platino.
3. La escala de los equipos generalmente no influye en la eficiencia de la pila de combustible.
4. Tienen una capacidad de conversión de alta energía debido a la baja polarización y al alto voltaje de salida.

Las pocas desventajas de SOFC es la resistencia óhmica exhibida por el electrodo de combustible y el electrodo de aire, que influye en la generación de energía.

[50] y sobretensión con hidrógeno y monóxido de carbono. Se están realizando estudios para rectificar estas discrepancias y poner de manifiesto la eficacia de la pila de combustible al máximo.

### *Pilas de combustible microbianas*

Las pilas de combustible microbianas son dispositivos que convierten la energía química presente en los compuestos orgánicos en energía eléctrica a través de catalizadores microbianos. Emplean bacterias en el ánodo para llevar a cabo la oxidación de materias orgánicas y bacterias o microalgas en el cátodo para someterse a reducción.

Tipos de CCM basados en los modelos de

reactor

Las CCM se pueden clasificar en dos tipos según los modelos de reactor:

En el primer tipo de CCM, los electrones se transfieren de las bacterias al ánodo sin la intervención de un producto de fermentación intermedio.

Dado que los microorganismos actúan como catalizadores en la transferencia de electrones del sustrato al ánodo, la selección de un consorcio microbiano de alto rendimiento (ya sea cultivo puro o mixto) es de crucial importancia en estas pilas de combustible microbianas. La transferencia de electrones de la bacteria al ánodo puede proceder de forma directa desde la membrana bacteriana a la superficie del ánodo o indirectamente por medio de un mediador. (Ruiz & Marrero, 2006)

Ambas transferencias a través del contacto bacteriano con el electrodo y a través de lanzaderas solubles pueden considerarse mediadas. En el primer caso, “una enzima redox bacteriana, inmovilizada en la pared celular, proporciona la transferencia de electrones. Ejemplos de tales bacterias son *Geobacter sulfurreducens* y *Rhodospirillum rubrum*” (Georgi & Leccese, 2013). Cuando se usa un mediador soluble, los electrones son transportados por moléculas mediadoras entre la (s) enzima (s) redox de las bacterias y la superficie del electrodo, lo que facilita el transporte de electrones.

Los mediadores son típicamente “moléculas redox (p. Ej., Ubiquinonas, tintes y complejos metálicos) que pueden formar parejas redox reversibles, son estables tanto en forma oxidada como reducida, no se degradan biológicamente y no son tóxicas para el consorcio microbiano” (Park & Zeikus, 2013).

### **Componentes de una célula de combustible microbiana**

Las pilas de combustible microbianas convencionales contienen un ánodo, un cátodo, una membrana de intercambio de protones y una resistencia a través de la cual pasan los electrones al ánodo.

El ánodo generalmente está inmovilizado con un consorcio bacteriano y el compartimiento del cátodo contiene la fuente microbiana. A veces, el compartimiento del ánodo se carga con la fuente de combustible o el material orgánico a oxidar. Después de la oxidación, los protones pasan a través de la membrana de intercambio de protones hasta el cátodo, donde se reducen a agua. (Park & Zeikus, 2013)

El segundo tipo de células microbianas, que funciona con un sistema de tres electrodos, también se emplea en el tratamiento de aguas residuales y otras aplicaciones. Estas pilas de combustible microbianas contienen tres electrodos: el electrodo de trabajo, el contra electrodo y el electrodo de referencia.

El electrodo de trabajo “es el cátodo que alberga las microalgas o bacterias. Puede ser un electrodo de carbono vítreo o un electrodo de platino sobre el que se inmovilizan las microalgas o bacterias. El contra electrodo funciona como conductor de electricidad. El electrodo de referencia es el estándar o el electrodo de referencia. La plata o la plata en cloruro de potasio son los electrodos de referencia más utilizados. La corriente generada se lee con la ayuda de un voltímetro cíclico. (Zhao & Hamisch, 2016)

### **Aplicaciones de células de combustible microbianas**

Las pilas de combustible microbianas se han convertido en una alternativa prometedora para la generación de electricidad, el cultivo de biomasa y el tratamiento de aguas residuales. Si las celdas de combustible microbianas utilizan energía solar para generar electricidad, entonces se denomi-

nan celdas de combustible microbianas fotoeléctricas. Si utilizan algas fotosintéticas para producir electricidad, entonces se denominan células de combustible microbianas de algas fotosintéticas. Por lo tanto, las celdas de combustible foto microbianas y las celdas de combustible microbianas fotosintéticas podrían considerarse los dos tipos diferentes de celdas de combustible microbianas.

### **Células de combustible microbianas en generación de electricidad**

Aunque el lanzamiento de las pilas de combustible microbianas se remonta a finales del siglo XVIII, cuando Luigi Galvani “informó por primera vez sobre la bioelectricidad conectando las ancas de rana a un conductor metálico, es en los últimos tiempos cuando se han desarrollado para recolectar electricidad, proporcionando así oportunidades para aplicaciones prácticas” (Schroder, 2003).

### **Mecanismo de producción de electricidad**

La reacción de oxidación y reducción que interviene en la cámara de ánodo y cátodo de una celda de combustible microbiana contribuye al flujo de electrones, que pasan a través de una resistencia para producir corriente. “Se construye una celda de combustible microbiana de tres cámaras con el ánodo inmovilizado con un consorcio bacteriano y el cátodo que contiene cualquier microorganismo, como bacterias o microalgas” (Rabaey, 2003). Por tanto, las vías metabólicas emprendidas por la bacteria son las únicas responsables del flujo de electrones y protones microbianos.

Para comprender cómo un CCM produce electricidad, se debe comprender cómo las bacterias capturan y procesan la energía.

Las bacterias crecen catalizando reacciones químicas y aprovechando y almace-

nando energía en forma de trifosfato de adenosina (ATP). En algunas bacterias, los sustratos reducidos se oxidan y los electrones se transfieren a las enzimas respiratorias por el NADH, la forma reducida del dinucleótido de nicotinamida y adenina (NAD). Estos electrones fluyen por una cadena respiratoria, “una serie de enzimas que funcionan para mover protones a través de una membrana interna, creando un gradiente de protones. Los protones regresan a la célula a través de la enzima ATPasa, creando 1 molécula de ATP a partir de 1 difosfato de adenosina por cada 3-4 protones. (Park & Zeikus, 2013)

Los electrones finalmente se liberan a un aceptor de electrones terminal soluble, como nitrato, sulfato u oxígeno.

Sin embargo, el potencial del ánodo determina el metabolismo de las bacterias. “Cuando la corriente del CCM aumenta, eventualmente disminuye el potencial del ánodo, lo que obliga a las bacterias a entregar electrones a través de complejos más reducidos (Rabaey, 2003). A altos potenciales anódicos, las bacterias pueden utilizar la cadena respiratoria en un metabolismo oxidativo. “Normalmente, la corriente de un CCM es inhibida por varios inhibidores de la cadena respiratoria. Al mismo tiempo, los procesos que utilizan fosforilación oxidativa producen un 65% de células MF de alta eficiencia” (Rabaey, 2003).

A bajos potenciales de ánodo y en presencia de un aceptor de electrones alternativo como el azufre, los electrones tienden a depositarse sobre estos componentes y la producción de metanol es alta, lo que indica que una bacteria no usa el ánodo. Si no hay presentes aceptores de electrones como azufre o nitrato, la fermentación será la reacción principal que producirá un máximo de un tercio de los electrones del sustrato de hexosa. Por tanto, la optimización del potencial del ánodo puede aumentar la eficiencia de una pila de combustible mi-

crobiana.

El rendimiento de un CCM está determinado por muchos factores, como la configuración del reactor, el pH, el cultivo de semillas o el sustrato, la resistencia a los electrolitos, etc. A pesar de eso, convierten una amplia gama de donantes de electrones con generación de energía efectiva a temperaturas bajas y moderadas, incluso cuando el donante de electrones se proporciona a bajas concentraciones. Esto los convierte en una de las fuentes de combustible alternativas incomparables.

### **Células de combustible microbianas en la producción de hidrógeno**

Los CCM también se pueden modificar para producir hidrógeno gaseoso (H<sub>2</sub>). De acuerdo con Rozendal, (2006)

Eliminando oxígeno en el cátodo y agregando un pequeño voltaje a través del proceso de reactor microbiano asistido bioelectroquímicamente (BEAMR) o el biocata, proceso de electrólisis lisado. Las bacterias producen un potencial de trabajo del ánodo de ~ -0,3 V. Los protones y electrones que se producen en el ánodo pueden combinarse en el cátodo para producir H<sub>2</sub> con sólo un potencial celular total adicional de 0,11 V. En la práctica, sin embargo, se deben poner 0,25 V o más en el circuito para producir H<sub>2</sub>, debido al sobrepotencial en el cátodo.

### **Células de combustible microbianas en el tratamiento de aguas residuales**

Se cree que las pilas de combustible microbianas sirven como una alternativa tecnológica viable al tratamiento convencional de aguas residuales. Los tratamientos convencionales de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos consumen mucha energía y son costosos debido a la necesidad de aireación y eliminación del exceso de lodo generado en el proceso. Los CCM pueden recolectar electricidad a

partir de la energía disponible en las aguas residuales orgánicas. “Están construidos con sistemas rentables, como cátodos de carbón activado y ánodos de escobillas de fibra de grafito” (Ruiz & Marrero, 2006). Más específicamente, las PACCM, que se construyen con una microalga inmovilizada en el cátodo, pueden contribuir generosamente a la producción de bioelectricidad, producción de biomasa y tratamiento de aguas residuales.

### **Bioremediación**

El CCM “no se utiliza para producir electricidad; en su lugar, se puede poner energía en el sistema para impulsar las reacciones deseadas para eliminar o degradar las sustancias químicas, como convertir el U (VI) soluble en U (IV) insoluble” (Zhang, Ahn, & Logan, 2014). Las bacterias no solo pueden donar electrones a un electrodo, sino que también pueden aceptar electrones del cátodo. Colocando los electrodos a -500 mV, Georgi & Leccese, (2013) “pudieron precipitar uranio directamente sobre un cátodo debido a la reducción bacteriana. El nitrato también se puede convertir en nitrito cuando se utilizan electrodos como donantes de electrones”.

### **Conclusión**

Es evidente que las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) han atraído la atención de muchos investigadores de todo el mundo. En el escenario actual, se están llevando a cabo diferentes tipos de investigaciones para poner de manifiesto la potencia de estas células. Hasta ahora, microorganismos como *C. vulgaris*, *L. discophora*, *K. pneumoniae*, *T. ferrooxidans*, *P. fluorescens*, *R. rubrum*, *G* se han empleado como pilas de combustible microbianas al igual que otras bacterias aeróbicas y anaerobias. También se cree que algunos otros microorganismos, como las cianobacterias y algunas microalgas, desempeñan funciones notables si se emplean en pilas de combustible

microbianas. Improvisar el funcionamiento de estas células para dar rendimientos exponenciales será el futuro esperado del campo. Aparte de su aplicación en la producción de bioelectricidad, tratamiento de aguas residuales y producción de biomasa.

Sin embargo, muy a pesar de que las CCM han mostrado un aumento notable en la producción de energía en los últimos años, no pueden considerarse como formas de suministro de energía. Actualmente, todavía, se requiere la optimización e identificación de suficientes materiales resistentes y membranas alternativas para los sistemas convencionales con el fin de superar las deficiencias aún presentes. Más estudio para expandir las aplicaciones de los CCM más allá de la generación de energía representa una máxima necesidad.

### Bibliografía

- Georgi, L., & Leccese, F. (2013). The open fuel cells jour. 1–20.
- Hacquard, A. (2005). Thesis submitted to the faculty of Worcester Polytechnic Inst.
- He, H., Zhou, M., & Yang, J. (2014). Simultaneous wastewater treatment, electricity generation and biomass production by an immobilized photosynthetic algal microbial fuel cell. *Biopro. Biosyst. Eng.*, 873- 880.
- McGrath, M. (2014). Direct methanol fuel cells. *J. Ind. Eng. Chem.*, 1063–1080.
- Neburchilov, V., Martin, J., & Wang, H. (2007). A review of polymer electro-lyte membranes for direct methanol fuel cells. *J. Pow. Sourc.*, 221–238.
- Park, D., & Zeikus, J. (2013). Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnol. Bioeng.*, 348–355.
- Rabaey, K. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol. Lett.*, 1531–1535.
- Rozendal, R. A. (2006). Principle and Perspectives of Hydrogen Production through Bio-catalyzed Electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy.*
- Rozendal, R., Hamelers, H., & Buisman, C. (2006). Effects of membrane cation transport on pH and microbial fuel cell performance. *Environ. Sci. Technol.*
- Ruiz, J., & Marrero, D. (2006). Pilas de combustible. *Researchgate*, 22.
- Schroder, A. (2003). Generation of microbial fuel cells with current outputs boosted by more than one order of magnitude. *Chem. Int. Ed. Engl.*, 2880–2883.
- Tender, M., Reimers, C., & Stecher, H. (2002). Harnessing microbially generated power on the seafloor. *Nat. Biotechnol.*, 821–825.
- Vishnyakov, V. (2016). Proton exchange membrane fuel cells. *Vacc.*, 1053– 1065.
- Wagner, N., Schulze, M., & Gulzow, E. (2004). Long term investigation of silver cathodes for alkaline fuel cells. *J Pow. Sourc.*, 264–272.
- Zhang, F., Ahn, Y., & Logan, B. (2014). Treating refinery wastewaters in microbial fuel cells using separator electrode assembly or spaced electrode configurations. *Bio-res. Technol.*, 46–52.
- Zhao, F., & Hamisch, F. (2016). Challenges and constraints of using oxygen cathodes in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.*, 5193.

### CITAR ESTE ARTICULO:

Robledo Gáneas, S. S., Martínez Mora, S. F., Navarrete Freire, N. C., & Vélez León, M. F. (2020). Microorganismos como fuente de Energía Alternativa. *RECIMUNDO*, 4(4), 161-173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.161-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.161-173)



CREATIVE COMMONS RECONOCIMIENTO-NOCOMERCIAL-COMPARTIRIGUAL 4.0.