



FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**MICROORGANISMOS ELECTROGÉNICOS: CÉLULAS DE COMBUSTIBLE
MICROBIANAS.**

Autor: Juan José Redondo Iriarte.
Tutor/es: María del Carmen Fajardo Adán.

Año 2018.



FACULTAD DE CIENCIAS

-
GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES.
TRABAJO DE FIN DE GRADO

**MICROORGANISMOS ELECTROGÉNICOS: CÉLULAS DE COMBUSTIBLE
MICROBIANAS.**

Tribunal de calificación:

(Firma)

Presidente: _____

(Firma)

Vocal 1º: _____

(Firma)

Vocal 2º: _____

Calificación: _____

Fecha: _____

Año 2018.

INFORME PARA LA DEFENSA PÚBLICA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

D/D^a _____, profesor/es
del Departamento/s de _____ de la
UAH, como tutor/res del Trabajo de Fin de Grado en _____
de D/D^a _____
titulado _____

(*) Realizado en _____

(*) Dirigido por D/D^a _____

INFORMA:

- FAVORABLE
- DESFAVORABLE

Alcalá de Henares de de 20....

Firma del tutor

Firma del cotutor

Fdo.: _____

Fdo.: _____

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	5
PALABRAS CLAVE.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4.1 MFCs: DEFINICIÓN Y ESTRUCTURA.....	11
4.1.1. Características del ánodo	13
4.1.2. Características del cátodo	14
4.1.3. Características de la membrana de intercambio de protones	15
4.2. TIPOS DE MFCs.....	16
4.3. MICROORGANISMOS ELECTROGÉNICOS	18
4.4. MECANISMOS PARA LA TRANSFERENCIA DE ELECTRONES	21
4.5. APLICACIONES DE LAS MFCs.....	25
4.5.1 Producción de energía eléctrica	26
4.5.2 Tratamiento de aguas residuales.....	26
4.5.3 Biorremediación	27
4.5.4 Biosensores	28
4.5.5 Producción de Biohidrógeno	28
4.5.6 Otras aplicaciones	29
4.6. LIMITACIONES DE LAS MFCs.....	29
5. CONCLUSIÓN	30
6. REFERENCIAS.....	32

RESUMEN

Con el fin de aportar soluciones que contribuyan a aliviar las necesidades energéticas de una población en constante desarrollo, nace una tecnología novedosa, las denominadas células de combustible microbiana (MFCs). para la producción de bioelectricidad. Su funcionamiento se basa en la utilización de microorganismos que oxidan la materia orgánica y transfieren los electrones resultantes de su metabolismo a un ánodo, que se encuentra conectado a un cátodo, a través de un material conductor que presenta una resistencia. Los microorganismos electrogénicos, es decir, aquellos responsables de catalizar estas reacciones electroquímicas, más representativos son los incluidos en la familia *Geobacteraceae*, siendo *Geobacter sulfurreducens* el microorganismo modelo. El estudio de los microorganismos electrogénicos ha permitido conocer mejor los mecanismos implicados en la interacción bacteria-electrodo y los factores que determinan su desarrollo, aumentando así el rendimiento de las MFCs. Esta interacción ofrece un gran número de potenciales aplicaciones prácticas en la producción de bioenergía, de biosensores, en biorremediación, etc. Sin embargo, numerosos aspectos de las MFCs han de ser mejorados y suponen hoy día un reto para la aplicación de estos sistemas a escala industrial, como son la forma de maximizar la producción de electricidad minimizando los costes de producción e implementación para su aplicación a gran escala. No obstante, la utilización de microorganismos con fines energéticos debe considerarse como un auténtico reto que permita aportar soluciones eficientes a las demandas energéticas actuales.

ABSTRACT

In order to provide innovative solutions that alleviate the energetic requirements of a growing population, a novel technology, the so-called microbial fuel cells (MFCs), emerged to produce bioelectricity. It is based on the use of microorganisms that oxidize organic matter and transfer the electrons resulting from their metabolism to an anode, which is connected to a cathode through a conductor of material that has a resistance. The electrogenic microorganisms, that is, those responsible for catalyzing these electrochemical reactions are mainly those included in the *Geobacteraceae* family, being *Geobacter sulfurreducens* the model microorganism. The study of electrogenic

microorganisms has allowed us to better understand the mechanisms involved in the bacteria-electrode interaction and the factors that determine their development, as well as the performance of MFC. This interaction offers many applications in the production of bioenergy, biosensors, bioremediation, etc. However, many aspects of MFCs need to be improved and represent a challenge for the application of these systems at industrial scale, such as how to maximize the production of electricity while minimizing production costs and implementation for large-scale application. However, the use of microorganisms with energetic purposes should be considered as a real opportunity to provide efficient solutions to current energy demands.

PALABRAS CLAVE

Celda de combustible microbiana (MFC), microorganismo electrogénico, *Geobacter sulfurreducens*, bioelectricidad, transferencia de electrones.

KEYWORDS

Microbial Fuel Cell (MFC), electrogenic microorganism, *Geobacter sulfurreducens*, bioelectricity, electron transfer.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, según la última revisión de la ONU en el año 2017, se estima que la población mundial está compuesta aproximadamente de 7,5 billones de personas, y se espera que se superen los 9 billones para el año 2050 (ONU, 2018). A medida que la población aumenta, también sus necesidades de bienestar lo hacen. Los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), recursos finitos y no renovables, constituyen el 79,4% del sector energético mundial (Romeva, 2015), por lo que son la principal fuente de energía, convirtiéndose en la columna vertebral del crecimiento económico e industrial de muchos países.

Sin embargo, la explotación de estos recursos genera problemas ambientales de gran importancia, incluyendo la generación de lluvia ácida, el incremento del efecto invernadero por la enorme cantidad de CO₂ emitido, la generación de cenizas, o de manera indirecta, la contaminación de suelos y de acuíferos. La energía nuclear, a pesar de generar grandes cantidades de energía, presenta inconvenientes, no sólo porque el uranio sea un recurso no renovable, sino por la generación de residuos nucleares muy nocivos para la salud humana y el medio ambiente.

Frente a esta situación, la sociedad se enfrenta al desafío de buscar nuevas alternativas que puedan satisfacer las necesidades energéticas existentes, y al mismo tiempo sean respetuosas con el medio ambiente.

La alternativa a los combustibles fósiles son fundamentalmente las energías renovables: fotovoltaica, solar térmica, hidráulica, eólica, marina, o la producción de biocombustible. No obstante, estas nuevas formas de energía también presentan inconvenientes ya que, por ejemplo, la producción de biocombustibles requiere de grandes extensiones de tierra (Pascual, 2012); en el caso de la solar y eólica, son dependientes de que se den las condiciones meteorológicas adecuadas, requieren de grandes inversiones y de una gran planificación (IPCC, 2014).

Sin embargo, las posibilidades de obtener energía no se reducen sólo a las anteriormente mencionadas. Entre los enfoques más novedosos y atractivos podemos señalar aquellos dirigidos a aprovechar la energía almacenada en la materia orgánica, fundamentalmente la existente en residuos, con la finalidad de producir energía eléctrica a través de reacciones catalizadas por

microorganismos. Es decir, la actividad metabólica de los microorganismos, y particularmente de las bacterias, acoplada a la biodegradación de compuestos orgánicos o de residuos, puede usarse para generar electricidad. Este proceso se desarrolla en las llamadas celdas de combustible microbianas (Microbial Fuel Cells, MFCs en sus siglas en inglés), una novedosa tecnología para la producción de bioelectricidad basada en el uso de microorganismos para oxidar el combustible (materia orgánica) y transferir los electrones resultantes a un ánodo, que se encuentra conectado a un cátodo a través de un material conductor que presenta una resistencia (Esteve-Núñez, 2008).

Esta prometedora tecnología se encuentra en proceso de investigación y desarrollo por el gran interés que ha suscitado, como lo pone de manifiesto el elevado número de publicaciones científicas y citas relacionadas con este campo de acuerdo con la ISI Web of Knowledge (aproximadamente un 75% de las publicaciones en sistemas bioelectroquímicos en 2016) (Santoro et al., 2017). A pesar de ser reconocido Grove (1838) como el padre de las pilas de combustibles, el estudio de la electricidad producida por seres vivos, comenzó en el siglo XVIII, cuando Luigi Galvani observó la producción de electricidad en las patas de una rana cuando los músculos de las ancas muertas se contraían al recibir una chispa eléctrica (Santoro et al., 2017); sin embargo, no sería hasta principios del siglo XX cuando Potter demostró la producción de energía eléctrica a partir de cultivos vivos de *Escherichia coli* o *Saccharomyces*, utilizando para ello electrodos de platino, siendo el primer MFC documentado (Ieropoulos et al., 2005). De esta forma, el concepto de bioelectricidad hace referencia a la capacidad de formas unicelulares microbianas para generar corriente eléctrica. En 1932 Francis Bacon desarrolló la primera pila de combustible de oxígeno, y en los años 60 la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) se interesó por esta tecnología para la eliminación y revalorización de los residuos, produciendo electricidad en los viajes espaciales (Santoro et al., 2017). Estos experimentos no generaron mucho interés hasta la década de 1980, cuando se descubrió que la densidad de la corriente y la producción de potencia podían mejorarse en gran medida mediante la adición de compuestos mediadores (Du et al., 2007).

En 2001, el campo de las MFCs pasó por una etapa de revolución cuyo origen fue la investigación de Reimers y su equipo. Demostraron que la energía

eléctrica se puede cosechar del gradiente de voltaje natural generado entre la zona anaerobia y la superposición de agua de mar oxigenada en los sedimentos marinos (pilas sedimentarias). Al estudiar en más profundidad el ánodo sumergido en este sedimento marino anóxico, se demostró que este gradiente se debía a la presencia de microorganismos electroactivos de la familia *Geobacteriaceae*, que fueron capaces de crecer oxidando compuestos orgánicos presentes en los sedimentos marinos utilizando un electrodo como único aceptor de electrones, desencadenando el comienzo de una nueva era en la tecnología de las MFCs (Borjas, 2016). Los resultados obtenidos en este trabajo pusieron de manifiesto por primera vez que la reducción de un electrodo podía sustentar el crecimiento bacteriano.

Desde entonces se ha desarrollado una gran variedad de sistemas innovadores relacionados con MFCs, como son las celdas de electrólisis microbianas (MECs) para la producción electroquímica de H₂, las células de desalinización microbiana (MDCs) para la desalinización de agua, las células de electrorremediación microbianas (MERCs) para la restauración de los ambientes contaminados o, también, las células microbianas de electrosíntesis (MES). Todas estas tecnologías integran la plataforma Microbial Electrochemical Technologies (METs) (Borjas, 2016).

Las MFCs pueden utilizarse como fuente de electricidad para impulsar dispositivos que requieran baja potencia, como teléfonos celulares y computadoras portátiles (Santoro et al., 2017), o para sustentar dispositivos de monitorización en sedimentos marinos (Tender et al., 2008); incluso, la robótica está beneficiándose con esta tecnología (Santoro et al., 2017).

Sin embargo, numerosos aspectos de las MFCs han de ser mejorados y suponen hoy día un reto para la aplicación de estos sistemas a escala industrial. Así, se está estudiando la forma de maximizar la producción de electricidad minimizando los costes de su producción e implementación para su aplicación a gran escala. Avances significativos para aumentar la densidad de corriente obtenida a partir de MFC se han llevado a cabo recientemente modificando la “arquitectura” de las células y los materiales utilizados para su construcción, investigando los distintos sustratos que pueden ser usados como combustibles en los ánodos microbianos, así como aumentando el conocimiento existente acerca de los microorganismos implicados en este proceso (factores que determinan o

influyen su desarrollo y metabolismo, y los mecanismos de transferencia electrónica entre ellos y el ánodo) (Lovley, 2008).

Considerando las limitaciones para la amplia utilización de MFCs como fuente alternativa de energía, los esfuerzos e investigaciones se han centrado en los últimos años en la búsqueda de diversas e interesantes aplicaciones en las que la obtención de energía no es el objetivo fundamental, sino una deseable consecuencia de su funcionamiento.

En cuanto a los microorganismos responsables de catalizar las reacciones electroquímicas que tienen lugar en las MFCs los más representativos son los incluidos en la familia *Geobacteraceae*, siendo *Geobacter sulfurreducens* el microorganismo modelo de estudio (Borjas, 2012).

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo será realizar una revisión bibliográfica acerca del conocimiento existente sobre los microorganismos electrogénicos y las MFCs, atendiendo especialmente a:

- 1) los principios y mecanismos del proceso electroquímico.
- 2) estudio de los principales microorganismos involucrados en la generación de energía eléctrica.
- 3) aplicaciones y perspectivas futuras de esta nueva tecnología.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha realizado una búsqueda documental, tanto presencial como on-line. La búsqueda on-line se realizó a través de los servidores disponibles de la BUAH, a través de los apartados catálogo y "recursos-e", mediante los cuales se accede a todo el material publicado disponible y a las diferentes bases de datos. Para realizar una revisión exhaustiva se ha utilizado las siguientes bases de datos: PubMed, Web of Science y Scopus. Los resultados obtenidos se acotaron filtrando la búsqueda por: palabras claves, últimos 15 años, disponibilidad del texto, fecha de publicación y texto completo en línea. Para seleccionar las publicaciones se han tenido en cuenta aquellas cuyo tema y contenido estaba relacionado y se adecuaba al objetivo de este trabajo. Se ha seleccionado las publicaciones más actuales y pertenecientes a revistas de impacto. Se ha excluido aquellas que no cumplían los requisitos de disponibilidad de texto, texto completo en línea y cuyo contenido no se adecuaba al objetivo de este trabajo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 MFCs: DEFINICIÓN Y ESTRUCTURA

Las MFCs son dispositivos que utilizan microorganismos para transformar la energía química almacenada en los compuestos orgánicos (y ocasionalmente en los inorgánicos) en energía eléctrica (Logan, 2006). También, se pueden definir como sistemas electroquímicos biocatalizados que funcionan convirtiendo la energía química en energía eléctrica a través de una cascada de reacciones redox (Mohan et al., 2014). Este proceso se da cuando los microorganismos son capaces de ceder los electrones obtenidos de la oxidación de un sustrato a superficies sólidas como un electrodo polarizado, proceso denominado bioelectrogénesis (Borjas, 2012). El desarrollo de esta tecnología precisa de la combinación de los conocimientos y contribuciones de diferentes ramas de la ciencia, como lo son la microbiología, para el reconocimiento y clasificación de aquellas bacterias con propiedades electrogénicas, la ingeniería y la electroquímica (Mora y Bravo, 2016).

La estructura más básica de un MFC consta de dos cámaras (Fig. 1), una anódica y otra catódica; en la cámara anódica, que se encuentra en condiciones anaerobias, las bacterias oxidan la materia orgánica produciendo CO_2 , electrones y protones. Estos electrones se transfieren a través un circuito eléctrico a la cámara catódica, generando corriente eléctrica; la cámara catódica, donde se encuentra el aceptor de electrones, y la cámara anódica están separadas por una membrana de intercambio catiónico, que permite el paso de los protones gracias a un gradiente de concentración (Borjas, 2016). El aceptor de electrones más comúnmente utilizado es el oxígeno, que en combinación con los protones se reduce a agua en el cátodo. Sin embargo, otra de las posibles aplicaciones de esta tecnología consiste en la utilización de esos electrones para la electrosíntesis de algunos compuestos como el hidrógeno, que veremos más adelante.

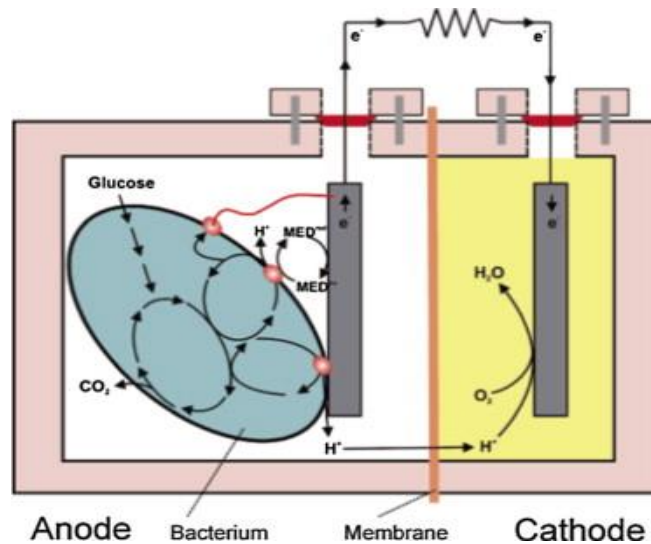


Fig. 1. Representación de un MFC clásico (Rahimnejad et al., 2015).

El rendimiento de las MFCs va a depender de factores biológicos y electroquímicos (Rabaey y Verstraete, 2005; Mohan et al., 2014), como son fundamentalmente:

- 1) La tasa de conversión del sustrato: influenciado por la cantidad de células bacterianas, los fenómenos de mezcla y transferencia de masa en el reactor, la cinética bacteriana, la carga orgánica de la biomasa, la eficiencia de la membrana de intercambio de protones para el transporte de protones, etc.
- 2) Del ánodo: su superficie, características electroquímicas, el potencial que presente, mecanismo de transferencia de electrones, etc.
- 3) Del cátodo: similares a las del ánodo.
- 4) Del rendimiento de la membrana de intercambio catiónico.
- 5) De la resistencia interna de la MFC, influenciada tanto por la resistencia del electrolito como por la resistencia de la membrana.
- 6) Del pH, ya que los cambios afectan a parámetros como la concentración de iones, el metabolismo de los microorganismos, etc.
- 7) De las comunidades que forman los biofilms y los mecanismos para transferir los electrones al electrodo.

Por lo tanto, para que una MFC genere una corriente de electrones que pueda ser utilizada, resulta de crucial importancia controlar los microorganismos utilizados para llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica, y el tipo de sustrato, ya sean carbohidratos, ácidos grasos y aminoácidos

procedentes de los sedimentos acuáticos y marinos, de las aguas residuales, lodos activados o anaerobios, etc. (Pandey et al., 2016).

4.1.1. Características del ánodo

El ánodo idóneo debe presentar unas características específicas, tales como una elevada conductividad eléctrica, ser resistentes a la corrosión, alta resistencia mecánica, ser biocompatible con los microorganismos, ser respetuoso con el medio ambiente y tener un bajo coste (Santoro et al., 2017). Además, deben presentar un área específica alta, alta porosidad y rugosidad y, sobre todo, deben ser químicamente estables en la solución del reactor (Borjas, 2016).

Los materiales más utilizados (Fig. 2) y que cumplen con todos estos requisitos, son aquellos que presentan carbón ya que, generalmente, son relativamente baratos, garantizan una gran área superficial, presentan una alta conductividad eléctrica y se pueden encontrar en diferentes formas, como el cepillo de fibra de grafito, tela de carbono, varilla de grafito, fieltro de carbono, los gránulos de grafito o el carbón activado (Rahimnejad et al., 2015; Borjas, 2016; Santoro et al., 2017). El uso de materiales metálicos (Fig. 2) en el ánodo es también frecuente, como la placa de acero inoxidable, malla de acero inoxidable, depurador de acero inoxidable, lámina de plata, lámina de níquel, lámina de cobre, lámina de oro y placa de titanio (Santoro et al., 2017).

Una estrategia empleada frecuentemente es la funcionalización química del electrodo que contribuye a aumentar la adhesión bacteriana al mismo y por tanto la eficiencia del dispositivo (Borjas, 2016).

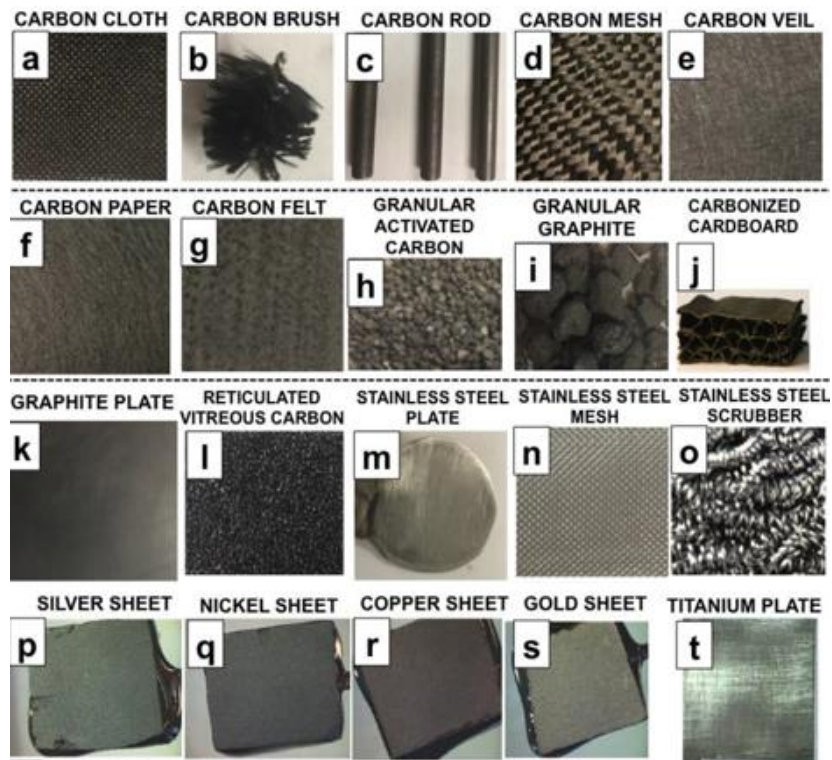


Fig. 2. Materiales utilizados para el ánodo (Santoro et al., 2017).

4.1.2. Características del cátodo

La mayor dificultad a la hora de diseñar una MFC reside en el cátodo, que debe presentar propiedades similares a las del ánodo. Los materiales deben tener un alto potencial redox y tener la capacidad de capturar protones fácilmente (Zhou et al., 2011). Los más utilizados para la fabricación de los cátodos son muy similares a los que se utilizan en el ánodo (Fig. 2).

El aceptor de electrones de la cámara catódica es uno de los principales factores que influyen en la generación de energía en las MFCs (He et al., 2015). Los aceptores de electrones se pueden clasificar en inorgánicos y en orgánicos.

Entre los principales aceptores de electrones inorgánicos podemos destacar:

- 1) El oxígeno es el más utilizado en el cátodo, ya que presenta un elevado potencial de oxidación, gran disponibilidad al ser un elemento muy abundante y, por lo tanto, no tiene un coste elevado (He et al., 2015; Borjas, 2016). Sin embargo, la reacción de reducción a pH neutro es lenta, por lo que se hace necesario la adición de catalizadores (He et al., 2017). Por ejemplo, para reducir los costes y eliminar el problema de las incrustaciones biológicas y químicas, se está trabajando con catalizadores para la reducción del oxígeno

que no tengan platino (Pt), como son óxidos de metales de transición, compuestos macrocíclicos metálicos, nanoestructuras de carbono o los polímeros electroconductores (Borjas, 2016; He et al., 2017).

2) Compuestos que contienen nitrógeno y otros aceptores de electrones inorgánicos como son el perclorato, el persulfato o el triyoduro (He et al., 2015).

3) Iones que contienen metal, siendo el ferrocianuro el más utilizado cuando el cátodo es de carbono; sin embargo, su uso es limitado ya que se debe regenerar químicamente. El permanganato y el hierro férrico han exhibido mejores rendimientos que el ferrocianuro (Logan et al., 2006; He et al., 2015; Borjas, 2016).

Entre los aceptores de electrones orgánicos más estudiados se encuentran los colorantes azo, utilizados en la industria textil como pigmentos (Solís et al., 2012), los compuestos aromáticos nitrogenados como el nitrobenzeno, o los clorofenoles como el pentaclorofenol o el 4-clorofenol (He et al., 2015).

En los últimos años, se está apostando por los denominados biocátodos, mediante el uso de microorganismos o algas, ya que son menos costosos y los procesos son más respetuosos con el medio ambiente (Gude., 2016).

4.1.3. Características de la membrana de intercambio de protones

Es el componente que permite que el protón llegue al cátodo. Sin embargo, puede no estar en una MFC, siempre que se garantice una separación física o electroquímica entre los electrodos del ánodo y el cátodo (Winfield et al., 2016). Los materiales usados, por excelencia, son el nafion, aunque presenta un alto coste, el hyflon, el zircon y el Ultrex CMI 7000, una membrana de polímero de ácido fuerte con poliestireno en gel y estructura de enlaces cruzados de divinilbenceno que incluye numerosos grupos de ácido sulfónico (Rahimnejad et al., 2015), conducen fácilmente los protones generados en la cámara anódica directamente a la cámara del cátodo (Leong et al., 2013). Otros materiales más asequibles económicamente son las fibras de nylon, las fibras de vidrio, el caucho natural, las bolsas de compra biodegradables o incluso los guantes de laboratorio (Santoro et al., 2017).

4.2. TIPOS DE MFCs

Como hemos mencionado con anterioridad, comúnmente su estructura consta de un ánodo y de un cátodo, separado por la membrana de intercambio de protones o conectados directamente. No obstante, se han desarrollado varias configuraciones como las MFCs de doble cámara, las MFCs de cámara única, las MFCs tubulares, las MFCs de placa y las MFCs apilados (Leong et al., 2013). En las MFCs de doble cámara (Fig. 3A), el ánodo y el cátodo se colocan en dos compartimentos distintos que están separados por una membrana de intercambio de protones o por un puente de sal, para permitir que los protones se desplacen hacia el cátodo mientras bloquea la difusión de oxígeno en el ánodo (Du et al., 2007; Leong et al., 2013).

Las MFCs de cámara única (Fig. 3B) consisten en una cámara anódica mientras que el cátodo, de naturaleza porosa, se expone directamente al aire, sin necesidad de una cámara catódica, siendo un diseño más simple y que representa menos costes (Leong et al., 2013; Mohan et al., 2014).

Las MFCs tubulares (Fig. 3C) presentan una estructura cilíndrica o tubular, donde la membrana de intercambio de protones se encuentra envuelta alrededor de la cámara del ánodo central, mientras que el cátodo se encuentra expuesto al aire (Leong et al., 2013). Los MFCs de placa (Fig. 3D), utilizados en la depuración de las aguas residuales, tienen una forma rectangular plana, donde se encuentra la membrana de intercambio de protones entre dos placas rectangulares no conductoras, cuyas superficies interiores están grabadas con canales de flujo, permitiendo que las aguas residuales fluyan sobre el lado del ánodo y el aire fluya en el lado del cátodo (Leong et al., 2013). Las MFCs apiladas (Fig. 3E) consisten en lograr una salida de tensión o corriente mejorada conectando varios MFCs en serie o en paralelo, permitiendo una velocidad de reacción bioelectroquímica máxima más alta (Du et al., 2007).

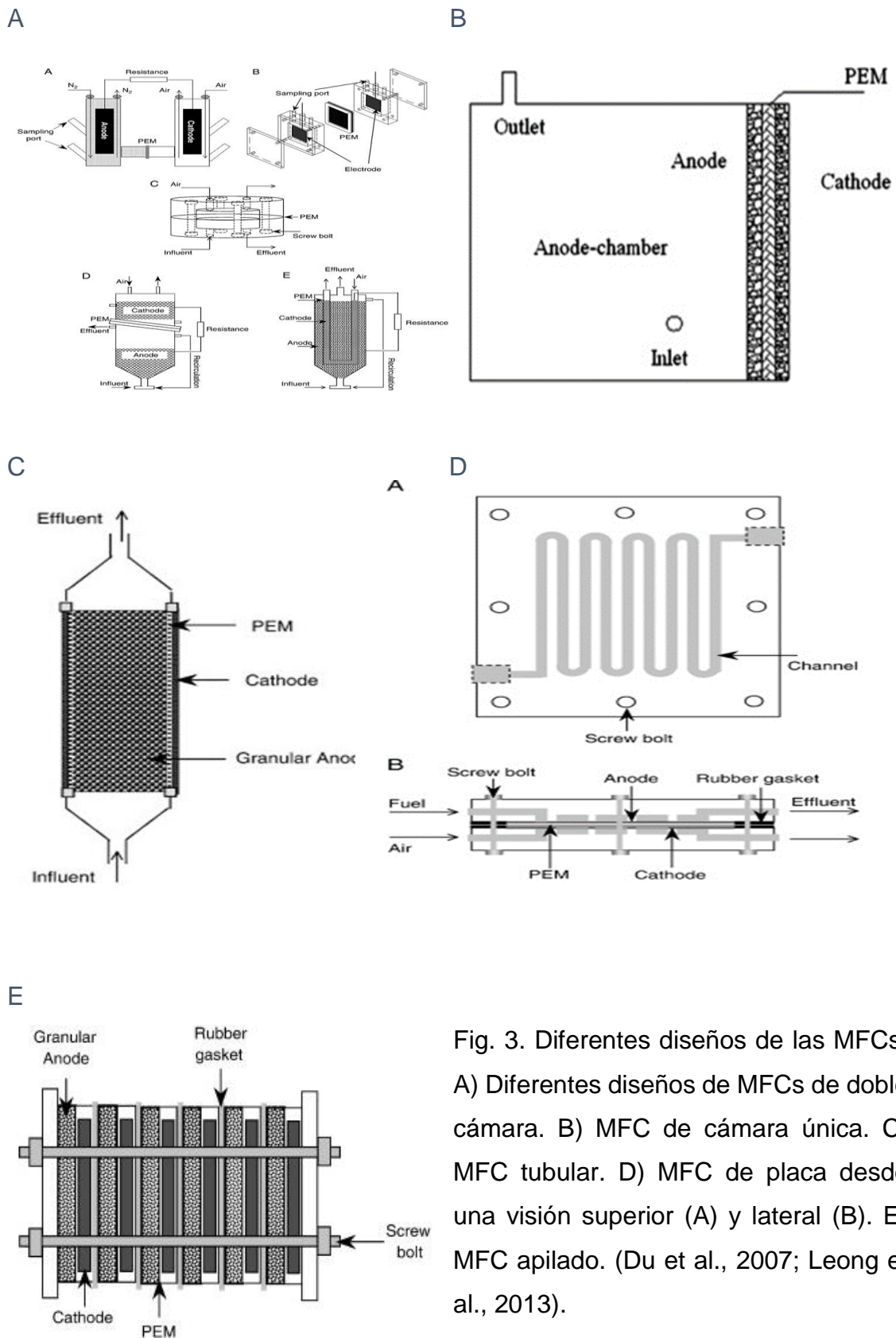


Fig. 3. Diferentes diseños de las MFCs: A) Diferentes diseños de MFCs de doble cámara. B) MFC de cámara única. C) MFC tubular. D) MFC de placa desde una visión superior (A) y lateral (B). E) MFC apilado. (Du et al., 2007; Leong et al., 2013).

4.3. MICROORGANISMOS ELECTROGÉNICOS

El fenómeno electroquímico microbiano consiste en la capacidad de ciertos microorganismos para transferir los electrones resultantes de su metabolismo a un aceptor terminal de electrones extracelular e insoluble (ya sean óxidos de hierro y manganeso, o un electrodo).

La clasificación y definición de un microorganismo productor de energía eléctrica, hoy en día, no está consensuada, debido a que es un campo todavía en desarrollo. Durante estos años, se les ha denominado como anófilos, exoelectrógenos, microorganismos electrogénicos, bacterias que respiran el ánodo y bacterias electroquímicamente activas (Lovley, 2008).

Se pueden definir como aquellos microorganismos que tienen la capacidad de intercambiar electrones con un electrodo y producir una corriente eléctrica (Lovley, 2012). La ubicuidad de bacterias electroactivas en una amplia variedad de hábitats pone de manifiesto la potencial versatilidad de la tecnología de las MFCs. Así, se han encontrado en gran diversidad de entornos como suelos, sedimentos, agua de mar o agua dulce, pero también en muestras recolectadas de una amplia gama de diferentes ambientes ricos en microorganismos, como los lodos activados o efluentes industriales y domésticos (Santoro et al., 2017). Las investigaciones se han centrado, principalmente, en aquellos que son capaces de ceder electrones al ánodo, aunque en los últimos años está emergiendo la biocatálisis catódica, es decir, el uso de microorganismos que aceptan electrones de un electrodo utilizándolos para la síntesis de algún compuesto.

En relación con los primeros, existe una gran diversidad de microorganismos con capacidad de producir energía eléctrica, siendo la mayoría de ellos mesófilos y reductores de metales, aunque hay especies termófilas como *Thermincola ferriacetica*, una bacteria Gram-positiva (Parameswaran et al., 2013), *Thermoanaerobacter*, con temperaturas de crecimiento óptimas de 60 °C, y *Calditerrivibrio nitroreducens*, con temperaturas de crecimiento óptimas a 55 °C (Yilmazel et al., 2018).

Para que se dé el intercambio de electrones, se debe favorecer la colonización y el asentamiento en los electrodos por parte de los microorganismos, a través de la formación de biopelículas. Una estrategia seguida para identificar aquellos microorganismos que contribuyen a la producción de energía eléctrica, ha sido

la identificación de los que colonizaban selectivamente la superficie del ánodo formando la biopelícula. Así, se ha descubierto que los grupos de bacterias más abundantes son las α -*Proteobacteria*, las δ -*Proteobacteria*, las γ -*Proteobacteria*, las β -*Proteobacteria*, las *Rhizobiales* y *Clostridia* (Biffinger et al., 2008; Lovley, 2008), dependiendo de la naturaleza del inóculo, del combustible (sustrato) o del tipo de MFC utilizados. Sin embargo, hay que considerar que el ánodo puede ser una superficie colonizada por una gran variedad de microorganismos que sólo lo utilicen como un soporte físico para crecer y no como un aceptor terminal de electrones, llevando a cabo metabolismos alternativos como fermentaciones, metanogénesis, etc., más aún cuando se utilizan sustratos orgánicos complejos como combustible (Esteve-Núñez, 2008; Lovley, 2008). En cambio, cuando se utilizan pilas sedimentarias, tanto en sedimentos marinos como de agua dulce, si parece existir un consenso que identifica a las δ -*Proteobacterias*, y en concreto a la familia *Geobacteraceae*, como los microorganismos dominantes, con probada actividad electrogénica. Otras bacterias con probada actividad electrogénica son entre otros, *Shewanella*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Rhodoferrax ferrireducens*, *Aeromonas hydrophila*, *Clostridium butyricum* y *Enterococcus gallinarum* (Esteve-Núñez, 2008).

La Tabla 1 recoge algunos de los microorganismos que poseen la capacidad de transferir electrones al ánodo, así como los sustratos orgánicos utilizados.

No obstante, dos géneros ejemplo de microorganismos electrogénicos han sido estudiados en mayor profundidad: *Shewanella* y, fundamentalmente, *Geobacter*, siendo en particular *G. sulfurreducens* el representante de los microorganismos electrogénicos.

Esta es una δ -*Proteobacteria*, Gram-negativa, de forma bacilar, anaerobia (aunque algunas cepas son capaces de respirar oxígeno cuando el aceptor terminal de electrones se encuentra en baja concentración), con un metabolismo respiratorio basado en la reducción desasimilativa de Fe (III), asociado a la oxidación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el acetato. Puede colonizar una gran variedad de nichos ecológicos anaerobios, como son los sedimentos acuáticos, los humedales, los arrozales y los ambientes subsuperficiales (Lovley et al., 2011).

Tabla 1. Microorganismos utilizados en las MFCs (Du et al., 2007).

Microorganismo	Sustrato	Aplicaciones
<i>Actinobacillus succinogenes</i>	Glucosa	Rojo neutro o tionina como mediador de electrones.
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Acetato	MFC sin mediador.
<i>Alcaligenes faecalis</i>	Glucosa	Consortios auto mediados aislados de MFC con un nivel máximo de 4.31 W m ⁻² .
<i>Clostridium beijerinckii</i>	Glucosa, lactato, melaza, almidón	Bacteria fermentativa.
<i>Clostridium butyricum</i>	Glucosa, lactato, melaza, almidón	Bacteria fermentativa.
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Sacarosa	Sulfato / sulfuro como mediador.
<i>Enterococcus gallinarum</i>	Glucosa	Consortios auto mediados aislados de MFC con un nivel máximo de 4.31 W m ⁻² .
<i>Erwinia dissolvens</i>	Glucosa	Complejo de quelato férrico como mediadores.
<i>Escherichia coli</i>	Glucosa, sacarosa	Se necesitan mediadores como el azul de metileno.
<i>Geobacter metallireducens</i>	Acetato	MFC sin mediador.
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Acetato	MFC sin mediador.
<i>Gluconobacter oxydans</i>	Glucosa	Se necesita mediador (HNQ, resazurina o tionina)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Glucosa	HNQ como mediador biomineralizado de manganeso como aceptor de electrones.
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Glucosa	Complejo de quelato férrico como mediadores
<i>Proteus mirabilis</i>	Glucosa	Tionina como mediador.
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glucosa	Consortios auto mediados aislados de MFC con un nivel máximo de 4.31 W m ⁻² y Piocianina y fenazina-1-carboxamida como mediador.
<i>Rhodoferrax ferrireducens</i>	Glucosa, sacarosa, maltosa, xilosa	MFC sin mediador.
<i>Streptococcus lactis</i>	Glucosa	Complejo de quelato férrico como mediadores.
<i>Shewanella oneidensis</i>	Lactato	Antraquinona-2,6-disulfonato (AQDS) como mediador.
<i>Shewanella putrefaciens</i>	Lactato, piruvato	El MFC sin mediador pero que incorpora un mediador de electrones como Mn (IV) o NR en el ánodo mejoró la producción de electricidad.

Las especies del género *Geobacter* generan gran interés, no sólo por su capacidad de transferir electrones de manera directa al ánodo oxidando

completamente la materia orgánica a CO₂, sino también por su amplia gama de aceptores terminales de electrones, entre ellos el U (VI), el V (V) o Ag (I), reduciéndolos a formas no solubles; además tiene la capacidad de oxidar compuestos aromáticos procedentes del petróleo, por lo que pueden desempeñar un papel importante en la eliminación de hidrocarburos aromáticos de acuíferos contaminados y en procesos de biorremediación en ambientes contaminados (Methé et al., 2003; Esteve-Núñez, 2008; Lovley et al., 2011). Su capacidad de oxidar completamente la materia orgánica aumenta significativamente la eficiencia para la “extracción” de electrones y, por tanto, en la generación de energía eléctrica. De hecho *G. sulfurreducens* es el microorganismo con mayor actividad electrogénica y el que tiene mayor capacidad de producir una densidad de corriente alta en cultivos puros y mixtos (Ritcher et al., 2008).

Como hemos mencionado, los microorganismos electrogénicos son aquellos que, en condiciones anaeróbicas, sustituyen moléculas insolubles (óxidos de hierro o manganeso) por un electrodo como aceptor terminal de electrones, siendo para ello necesario que posean mecanismos específicos que permitan conectar la cadena respiratoria interna con el aceptor de electrones externo. Sin embargo, estos mecanismos utilizados de transferencia de electrones difieren de unos microorganismos a otros, siendo este aspecto de crucial importancia para determinar la eficiencia del proceso.

4.4. MECANISMOS PARA LA TRANSFERENCIA DE ELECTRONES

Para que se dé el intercambio de electrones, se debe favorecer la colonización y el asentamiento en los electrodos por parte de los microorganismos, a través de las biopelículas. Para ello, se deben inocular los cultivos en condiciones anaerobias para facilitar su crecimiento, evitando el crecimiento de microorganismos aerobios que puedan competir por la materia orgánica (Reguera et al., 2006). El enriquecimiento de la biopelícula, en líneas generales, se hace mediante la adición de vitamina y de nutrientes esenciales o bien mediante la técnica de trasplantar sucesivamente generaciones de biopelículas recolectadas de un ambiente natural o procedentes de un electrodo ya colonizado (Santoro et al., 2017).

La capacidad de los microorganismos para intercambiar electrones con un electrodo para producir corriente eléctrica puede interpretarse como un resultado fortuito del hecho de que algunos microorganismos han desarrollado durante millones de años de evolución estrategias efectivas para el intercambio extracelular de electrones con minerales insolubles u otros aceptores naturales relacionados (Lovley, 2012). Este proceso de transferencia extracelular de electrones puede llevarse a cabo principalmente por dos mecanismos: directo o indirecto. Estos mecanismos no son mutuamente excluyentes de modo que los microorganismos pueden usar ambos simultáneamente.

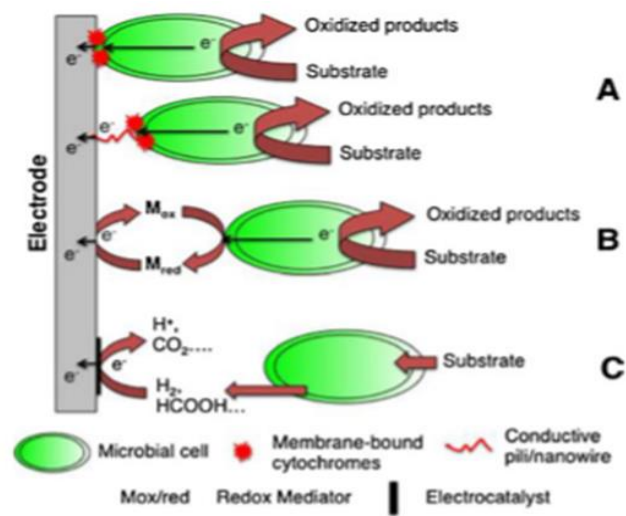


Fig. 4. Distintas vías para la transferencia de electrones: A) Mediante contacto directo con el ánodo o mediante pili, B) mediante mediadores redox y C) utilización de productos metabólicos procedentes de la fermentación como mediadores redox (Patil et al., 2012).

La **vía indirecta** (Fig. 4) se basa en la utilización de mediadores redox, es decir, compuestos solubles que actúan como una herramienta indispensable para aquellos organismos que no son capaces de transmitir directamente los electrones al ánodo, facilitando la interacción microorganismo-electrodo (Esteve-Núñez, 2008). Estos mediadores deben presentar ciertas características, como tener un potencial positivo para facilitar la transferencia de electrones, no intervenir en el metabolismo bacteriano y ser reversible electroquímicamente (Patil et al., 2012). Puede subdividirse en dos vías:

- 1) Mediadores redox añadidos artificialmente como son el rojo neutro, el azul de metileno, 2-hidroxi-1,4-naftoquinona (HNQ), el azul de Meldola (MelB), el resazurin, la tionina, el viológeno de metilo o las sustancias húmicas; sin embargo, muchos de ellos presentan cierta toxicidad y no son económicamente rentables en procesos a gran escala (Rabaey y Verstraete, 2005; Stams et al., 2006; Rabaey et al., 2010; Lovley, 2012; Patil et al., 2012; Mohan et al., 2014).
- 2) Mediadores redox producidos por los microorganismos: en este caso los compuestos reducidos en la cadena transportadora interna difunden hacia el exterior celular donde son oxidados en la superficie del ánodo, retornando de nuevo al interior celular en su forma oxidada. Entre los más comunes podemos destacar las flavinas, como en el caso de *Shewanella oneidensis* para la reducción de los óxidos de Fe (III) (Lovley, 2012), la melanina, las cisteínas o las fenazinas, como la piocianina producida por *Pseudomonas aeruginosa* (Stams et al., 2006; Patil et al., 2012). El inconveniente que tiene esta vía es que la membrana externa bacteriana suele actuar como una barrera poco permeable para estos compuestos, generando una baja producción de potencial de la MFC (Mohan et al., 2014). Un caso particular de la transferencia indirecta de electrones es la utilización de productos metabólicos reducidos (ácidos, hidrógeno o alcoholes), procedentes de la fermentación, como mediadores redox (ej. *Clostridium cellulolyticum*) (Niessen et al., 2005; Borjas, 2016). El inconveniente que presenta es que los productos de fermentación reaccionan muy lentamente con el electrodo, además de ensuciarlo por los procesos de oxidación que se producen (Patil et al., 2012).

La **vía directa** (Fig. 4) consiste en que el microorganismo es capaz de transferir los electrones contactando físicamente con el ánodo sin la necesidad de un mediador, siendo los miembros de la familia *Geobacteraceae*, el ejemplo por excelencia de microorganismo que utilizan esta vía (Methé et al., 2003). Puesto que no dependen de la síntesis de mediadores redox para la respiración de óxidos de hierro o manganeso no solubles, cuentan con un mecanismo en el que están involucrados transportadores de electrones unidos a membrana que expanden la cadena de electrones desde la membrana interna hasta el ambiente extracelular (Bond y Lovley, 2003). Este proceso está mediado por la presencia

de los citocromos tipo C que se encuentran en la membrana externa como parte de la cadena de transporte electrónico (Borjas, 2012).

G. sulfurreducens, el microorganismo electrogénico más extensamente estudiado, presenta hasta 111 genes que codifican para los citocromos de tipo C, donde la mayoría de ellos albergan múltiples grupos hemo que actúan como portadores de electrones (Methé et al., 2003; Borjas, 2016). El flujo de electrones comienza desde la proteína de membrana interna MacA y continúa hasta la proteína periplásmica PpcA (Fig. 5), que luego transfiere electrones a los citocromos de la membrana externa, en la superficie celular (Patil et al., 2012), siendo los citocromos OmcS, OmcB y OmcZ, los más representativos; en concreto OmcZ parece ser el responsable de la transferencia directa de electrones entre el biofilm de *G. sulfurreducens* y el electrodo, y es esencial para generar altos niveles de corriente (Lovley, 2012; Patil et al., 2012).

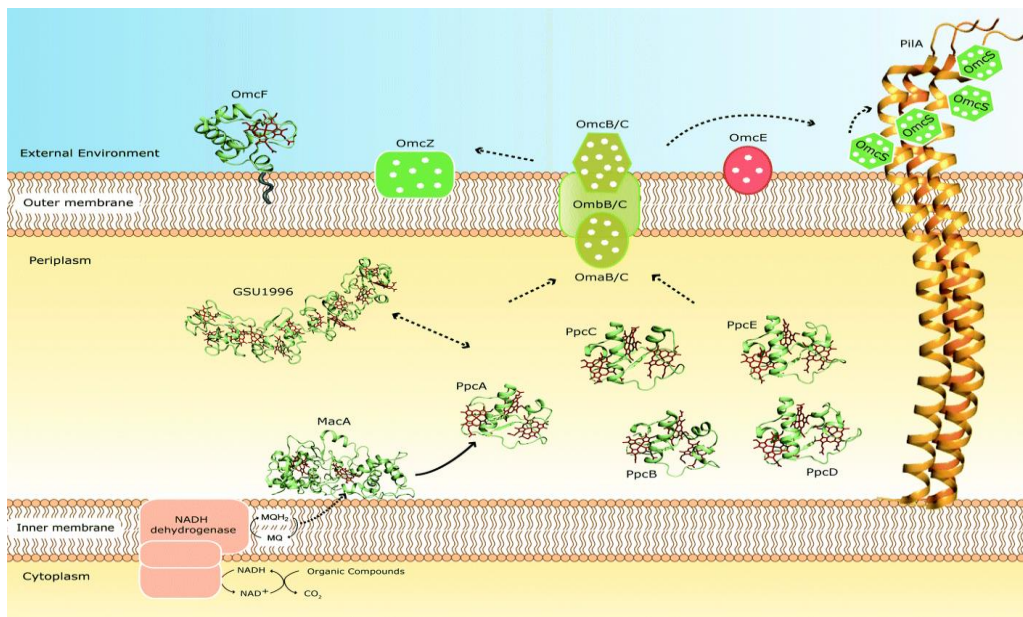


Fig. 5. Representación de la membrana interna de *G. sulfurreducens* (Santos et al., 2015).

En algunos casos, estos citocromos C estarán posicionados lo suficientemente próximos a la superficie del electrodo para que tenga lugar una transferencia directa de electrones. Sin embargo, la producción de corriente de una monocapa de células en contacto directo con la superficie del electrodo está limitada por el

espacio disponible para los microorganismos. Densidades de corriente más altas son posibles gracias a que las biopelículas formadas sean eléctricamente conductoras, de manera que permitan que múltiples capas de células contribuyan a la producción de electricidad. Esta posibilidad fue propuesta por primera vez en los estudios llevados a cabo con *G. sulfurreducens* (Reguera et al., 2006). Las evidencias científicas encontradas sugieren que la conductividad de estas biopelículas puede atribuirse a una densa red de pili con conductividad de tipo metálico (Fig. 4A). Estos pili actuarían como nanocables, es decir, apéndices o filamentos extracelulares cuya conductividad eléctrica es similar a un conductor metálico y permite el intercambio de electrones entre los microorganismos y el entorno extracelular en el que se encuentran (Malvankar y Lovley, 2014; Lovley, 2017). Estos filamentos están compuestos de una proteína llamada pilina o PilA, codificada por el gen *pilA* (Borjas, 2016), que al empaquetarse forma aminoácidos aromáticos, que son los que le dan la propiedad de conducir electrones (Lovley, 2017). El citocromo de tipo C OmcS está asociado a los pili, ya que facilita la reducción de los ánodos y de los óxidos de Fe (III), así como la transferencia directa de electrones entre las bacterias, aunque los filamentos recubiertos con OmcS no son suficientes por sí mismos para la transferencia efectiva de electrones (Lovley, 2012; Simonte et al., 2017; Park et al., 2018).

4.5. APLICACIONES DE LAS MFCS

Como se ha expuesto anteriormente, la electromicrobiología tiene el potencial de aliviar las necesidades de la sociedad actual. Aunque inicialmente los esfuerzos se enfocaron hacia la optimización de las MFCs para obtener energía eléctrica, distintas y prometedoras aplicaciones de las interacciones microorganismo-electrodo han emergido en los últimos años. Esta interacción ofrece pues un gran número de potenciales aplicaciones prácticas en bioenergía, biosensores, biorremediación, etc., además de servir como modelo para estudiar fenómenos naturales importantes, como la transferencia de electrones entre especies en ambientes anaerobios (Lovley, 2012). A continuación, detallaremos algunas de las aplicaciones prácticas más importantes de este fenómeno.

4.5.1 Producción de energía eléctrica

Esta tecnología se puede aplicar en pequeños sistemas eléctricos que no precisan de grandes requerimientos energéticos y cuyas aplicaciones no consuman grandes cantidades de energía (Fig. 7) como, por ejemplo, boyas meteorológicas que son alimentadas por MFCs bentónicos, es decir, que generan energía a través de la oxidación microbiana de sustratos orgánicos en sedimentos marinos anóxicos (González del Campo, 2015), o su uso para alimentar diversos tipos de sensores ambientales (como sensores para medir la temperatura o el sensor subacuático SUR para la investigación de la pesca), activar un reloj de pulsera digital, alimentar sensores inalámbricos e, incluso, para recargar teléfonos móviles (Donovan et al., 2013; Papaharalabos et al., 2013; Thomas et al., 2013; Khaled et al., 2016; Santoro et al., 2017). Así mismo, existen prometedores avances en la aplicación de las MFCs en el campo de la robótica. Por ejemplo, se ha empleado en el robot Ecobot, que utiliza para su funcionamiento un MFC alimentado con glucosa sin necesidad de utilizar otro tipo de baterías. A largo plazo, se cree que se podrá usar en dispositivos como los MP3 o en juguetes para niños (González del Campo, 2015).

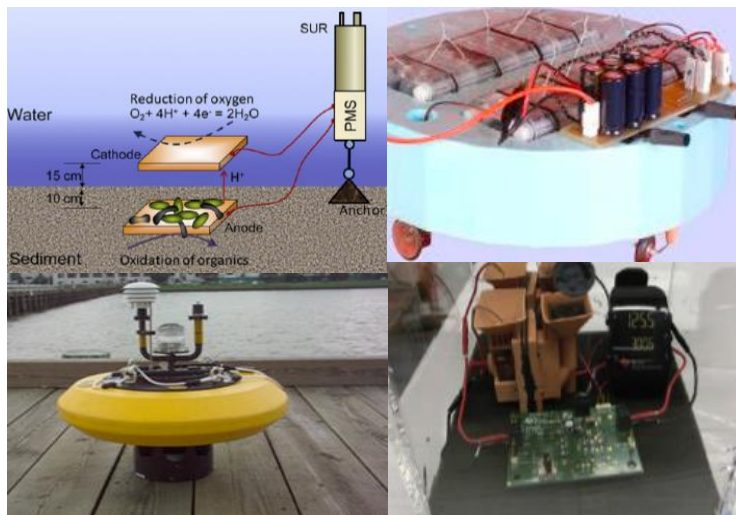


Fig. 7. Representación gráfica del funcionamiento del SUR e imágenes de aplicaciones prácticas de las MFCs (Donovan et al., 2013; Papaharalabos et al., 2013; Santoro et al., 2017).

4.5.2 Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales presentan compuestos orgánicos que necesitan ser eliminados por ser contaminantes para el medio ambiente. Sin embargo, también puede considerarse un recurso en vez de un residuo, ya que pueden usarse como una fuente de energía (Mccarty et al., 2011). Los procesos de depuración y mantenimiento de las aguas residuales requieren de un alto coste monetario y

energético, sobre todo asociado al proceso de aireación y producción de lodos que pueden suponer el 75% de los costes de energía de la planta, mientras que el tratamiento y la eliminación de lodos puede llegar hasta un 60% de los costes totales de operación (Gude, 2016). Las MFCs se han mostrado como una opción real en el tratamiento de casi todo tipo de residuos, incluidas las aguas residuales municipales, cerveceras, agrícolas, de refinería, de destilerías, de reciclaje de papel e incluso de lixiviados de vertederos, transformando los desechos en electricidad y eliminando los olores (Kim et al., 2008); la destilería junto con las aguas residuales de la industria de procesamiento agrícola parecen ser las mejores candidatas, debido a la presencia de inhibidores metanogénicos (Huggins et al., 2013; Pandey et al., 2016; He et al., 2017). En otras palabras, las MFCs pueden recuperar la energía contenida en esas aguas residuales transformándola en energía eléctrica limpia.

La cantidad de energía generada por los MFCs en el proceso de tratamiento de aguas residuales, puede reducir a la mitad la electricidad necesaria en un proceso de tratamiento convencional (Oh et al., 2010), pudiéndose alcanzar una densidad de potencia equivalente a 0.07 kWh/m^3 durante un periodo de 6 horas, aunque esta recuperación de energía es baja si se tiene en cuenta que los desechos orgánicos en las aguas residuales domésticas pueden producir alrededor de los 2 kW/hm^3 , basándose en el gas metano que se puede generar en la digestión anaeróbica (Bajracharya et al., 2016). Sin embargo, el gas metano producido tiene un gran efecto invernadero.

Hasta la fecha, de acuerdo con Borjas (2016), se ha usado con éxito esta tecnología a escala piloto.

4.5.3 Biorremediación

Cada vez más, los científicos se están enfocando en esta vía, ya que permitiría tratar grandes superficies de terrenos afectados por contaminantes. Se ha demostrado que la presencia de un electrodo en un ambiente contaminado incrementa notablemente la biorremediación, probablemente aumentando la disponibilidad de aceptores terminales de electrones y, por tanto, maximizando la actividad metabólica microbiana para degradar un determinado contaminante (Borjas, 2016). De esta forma han sido tratados ambientes contaminados con compuestos orgánicos (halogenados, fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos), con metales pesados en forma soluble como el uranio (VI), el

cadmio (V) o el cromo (VI), reduciéndolos a formas insolubles para su eliminación, evitando su filtración a las capas freáticas (Hong y Gu, 2009; Rabaey et al., 2010; Franks, 2014; González del Campo, 2015). Así mismo, se han tratado exitosamente suelos saturados contaminados con herbicidas como el isoproturón (Borjas, 2016).

4.5.4 Biosensores

La detección y el análisis de los contaminantes que suponen un riesgo para la salud de las personas y del medio ambiente, es de vital importancia, por lo que los biosensores se han creado como una herramienta muy útil para dicha función. Su funcionamiento consiste en medir las variaciones de la corriente eléctrica como consecuencia de la afección a la actividad bacteriana al oxidar los compuestos orgánicos para la producción de energía eléctrica (Bajracharya et al., 2016; Zhou et al., 2017). Los biosensores asociados a MFCs, a diferencia de una batería, no tienen una vida útil restringida y no tienen que cambiarse ni recargarse, por lo que son adecuados para la medición de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y el análisis de compuestos tóxicos (González del Campo, 2015; Rahimnejad et al., 2015).

4.5.5 Producción de Biohidrógeno

Modificándose la estructura de una MFC se puede producir hidrógeno aprovechando la energía generada, transformando la MFC en una Célula de Electrolisis Microbiana o MEC (Fig. 6). (Du et al., 2007; Azwar et al., 2014). Se ha demostrado cómo, aumentando el potencial electroquímico utilizando un voltaje adicional al generado tras la oxidación microbiana de la materia orgánica, puede sintetizarse hidrógeno a partir de los electrones y los protones producidos (Borjas, 2016).

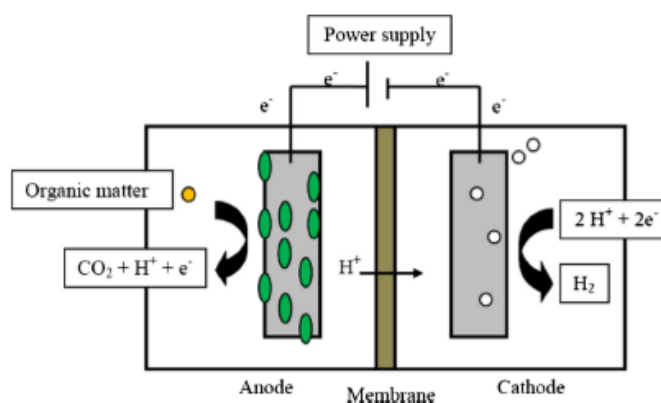


Fig. 6. Representación gráfica de una MEC (Kadier et al., 2016).

De esta forma, en las MECs, el hidrógeno puede ser producido con un bajo coste, puesto que la mayor parte de la energía requerida procede de la obtenida de la oxidación microbiana de la materia orgánica en el ánodo. Aunque es necesario utilizar un voltaje adicional, este es un orden de magnitud menor que el que se requiere en la electrolisis del agua, demostrando el gran potencial de esta tecnología.

4.5.6 Otras aplicaciones

La potencial utilización de las MFCs en la biomedicina es un reto futuro, postulándose que la implantación de celdas en miniatura en el interior del cuerpo humano podría usarse en marcapasos o en mediciones de glucosa en sangre (González del Campo, 2015). En regiones costeras, donde la disponibilidad de agua dulce es baja, se pueden utilizar una versión de las MFCs para desalar agua de mar, las denominadas MDCs (Células de Desalación Microbianas) (Borjas, 2016).

En resumen, las principales ventajas que posee esta tecnología son la conversión directa de energía desde el sustrato a electricidad, operando eficazmente a temperatura ambiente e incluso a temperaturas bajas; además el CO₂ que se produce es menor en comparación a los de procedencia fósil, no posee partes móviles, presenta múltiples aplicaciones que pueden satisfacer necesidades básicas en zonas remotas y es una tecnología fácil de manipular (González del Campo, 2015).

4.6. LIMITACIONES DE LAS MFCs.

La rápida evolución de la tecnología MFC en los diseños de reactores, la selección de materiales y la gran variedad de sustratos que se pueden utilizar para alimentar las celdas ha acercado mucho más su potencial y aplicación para la producción de bioenergía y el tratamiento simultáneo de aguas residuales (Pandey et al., 2016).

Sin embargo, a pesar de todos los estudios realizados y los avances que han llevado consigo, las MFCs todavía tienen que enfrentarse a desafíos

importantes, de diferentes disciplinas científicas, si quieren ser una opción real de energía renovable. Para empezar, el coste de los electrodos y las membranas de intercambio catiónico es elevado, limitando su aplicación a escala industrial (Zhou et al., 2011; He et al., 2017). Otro problema que hay que tener en consideración es la lenta velocidad de reducción del oxígeno en el cátodo, lo que dificulta transformar con éxito los reactivos en productos, necesitando para ello el uso de catalizadores (He et al., 2017). Además, el potencial de bioensuciamiento, la alta resistencia interna de la membrana, la tasa de transferencia de protones y electrones limitada, y los sobrepotenciales en el ánodo y en el cátodo, restringen la generación de energía y limitan la aplicación práctica de las MFCs (Rabaey et al., 2004; Leong et al., 2013). Se han diseñado MFCs sin membrana en un intento de eliminar los problemas de resistencia y de transferencia limitada de electrones, pero con el inconveniente de generar biopelículas en el cátodo, limitando la difusión del oxígeno al cátodo y, por tanto, limitando el rendimiento (Leong et al., 2013).

Por otra parte, sigue habiendo controversia en el ámbito científico sobre la relevancia ecofisiológica de los modos propuestos de transferencia de electrones, como en el caso de *Geobacter* o de *Shewanella* (Nealson y Rowe, 2016), por lo que se necesita profundizar en el conocimiento de los mecanismos de transferencia y aceptación de electrones, y en la minimización de las pérdidas de transferencia de los mismos, mediante el desarrollo de configuraciones estructurales novedosas en la arquitectura ánodo-cátodo que reduzcan la distancia entre los electrodos (Lovley, 2012; Gude, 2016). Así mismo, las relaciones biológicas de los diferentes microorganismos que se encuentran en el ánodo deben recibir la atención adecuada para maximizar los beneficios. Todo esto, contribuye a que las MFCs no puedan competir actualmente con otros sistemas de energía alternativa como la solar y la eólica (Wang et al., 2015).

5. CONCLUSIÓN

A pesar de las limitaciones que existen en la aplicación de esta tecnología a escala industrial, no se puede negar que su potencial como fuente de energía renovable que permita ayudar a resolver la crisis energética merece que se siga investigando para poder mejorar el rendimiento, encontrar materiales que

reduzcan los costes, así como comprender mejor la interacción de los microorganismos en la biopelícula y con los electrodos.

La utilización de microorganismos con fines energéticos debe considerarse como un auténtico reto que permita aportar soluciones eficientes a las demandas energéticas actuales, simplemente permitiendo y facilitando que los microorganismos realicen lo que mejor saben hacer: biotransformar la materia orgánica. Con esfuerzo, con los recursos necesarios y, sobre todo, con voluntad de cambiar y mejorar el mundo en el que vivimos, se podrá desarrollar esta tecnología que aún se encuentra en fase de desarrollo.

6. REFERENCIAS

- Azwar, M.Y., Hussain, M.A., y Abdul-Wahab, A.K. (2014). Development of biohydrogen production by photobiological, fermentation and electrochemical processes: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 158-173.
- Bajracharya, S., Sharma, M., Mohanakrishna, G., Benneton, X. D., Strik, D. P., Sarma, P. M., y Pant, D. (2016). An overview on emerging bioelectrochemical systems (BESs): Technology for sustainable electricity, waste remediation, resource recovery, chemical production and beyond. *Renewable Energy*, 98, 153-170.
- Biffinger, J.C., Byrd, J.N., Dudley, B.L., y Ringeisen, B.R. (2008). Oxygen exposure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 23(6), 820-826.
- Bond, D.R., y Lovley, D.R. (2003). Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(3), 1548-1555.
- Borjas, Z. (2012). *Biodregadación electrogénica de acetato en pilas de combustible microbianas*. Trabajo fin de Máster. Universidad de Alcalá de Henares.
- Borjas, Z. (2016). *Physiological and operation strategies for optimizing geobacter-based electrochemical systems*. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.
- Donovan, C., Dewan, A., Heo, D., Lewandowski, Z., y Beyenal, H. (2013). Sediment microbial fuel cell powering a submersible ultrasonic receiver: New approach to remote monitoring. *Journal of Power Sources*, 233, 79-85.
- Du, Z., Li, H., y Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464-482.
- Esteve-Núñez, A. (2008). Bacterias productoras de electricidad. *Revista Actualidad Sociedad Española de Microbiología*, volumen, 38-43.
- Franks, A.E., y Nevin, K.P. (2010). Microbial fuel cells, a current review. *Energies*, 3(5), 899-919.

- González del Campo, A. (2015). *Valorización energética y tratamiento de efluentes mediante celdas de combustible microbiana*. Tesis doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Gude, V.G. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells—an overview. *Journal of Cleaner Production*, 122, 287-307.
- He C.S., Mu Z.X., Yang H.Y., Wang Y.Z., Mu Y. y Yu, H.Q. (2015). Electron acceptors for energy generation in microbial fuel cells fed with wastewaters: A mini-review. *Chemosphere*, 140, 12-17.
- He, L., Du, P., Chen, Y., Lu, H., Cheng, X., Chang, B., y Wang, Z. (2017). Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 388-403.
- Hong, Y., y Gu, J.D. (2009). Bacterial anaerobic respiration and electron transfer relevant to the biotransformation of pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(8), 973-980.
- Huggins, T., Fallgren, P.H., Jin, S., y Ren, Z.J. (2013). Energy and performance comparison of microbial fuel cell and conventional aeration treating of wastewater. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 6(2).
- Ieropoulos, I.A., Greenman, J., Melhuish, C., y Hart, J. (2005). Comparative study of three types of microbial fuel cell. *Enzyme and Microbial Technology*, 37(2), 238-245.
- IPCC. (2014). Cambio climático. *Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure_es.pdf.
- Kadier, A., Simayi, Y., Abdeslahian, P., Azman, N.F., Chandrasekhar, K., y Kalil, M.S. (2016). A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 427-443.
- Khaled, F., Ondel, O., y Allard, B. (2016). Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor. *Journal of Power Sources*, 306, 354-360.

- Kim, J. R., Dec, J., Bruns, M. A., & Logan, B. E. (2008). Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(8), 2540-2543.
- Leong, J.X., Daud, W.R.W., Ghasemi, M., Liew, K.B., y Ismail, M. (2013). Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 575-587.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., y Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192.
- Lovley, D.R. (2008). The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(6), 564-571.
- Lovley, D.R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N.S., Shrestha, P.M., Flanagan, K.A, Akluike, M., Butler, J.E., Giloteaux, L., Rotaru, A.E., Holmes, D.E., Franks, A.E., Orellana, R., Risso, C., y Nevin, K.P. (2011). *Geobacter*: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *In Advances in Microbial Physiology*, 59, 1-100.
- Lovley, D.R. (2012). Electromicrobiology. *Annual Review of Microbiology*, 66, 391-409.
- Lovley, D.R. (2017). Electrically conductive pili: Biological function and potential applications in electronics. *Current Opinion in Electrochemistry*, 4(1), 190-198.
- Malvankar, N.S., & Lovley, D.R. (2014). Microbial nanowires for bioenergy applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 88-95.
- McCarty, P.L., Bae, J., y Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer—can this be achieved? *Environmental Science & Technology*, 45 (17), 7100-7106.
- Methe, B.A., Nelson, K.E., Eisen, J. A., Paulsen, I.T., Nelson, W., Heidelberg, J.F., Wu, D., Wu, M., Ward, N., Beanan, M.J., Dodson, R.J., Madupu, R., Brinkac, L.M., Daugherty, S.C., DeBoy, R.T., Durkin, A.S., Gwinn, M., Kolonay, J.F., Sullivan, S.A., Haft, D.H., Selengut, J., Davidsen, T.M., Zafar, N., Blanco, O., Tran, B., Romero, C., A Forberger,

- H., Weidman, J., Khouri, H., Feldblyum, T.V., Utterback, T.R., Van Aken, S.E., Lovley, D.R., y Fraser, C.M. (2003). Genome of *Geobacter sulfurreducens*: metal reduction in subsurface environments. *Science*, 302(5652), 1967-1969.
- Mohan, S.V., Velvizhi, G., Modestra, J.A., y Srikanth, S. (2014). Microbial fuel cell: critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 779-797.
 - Mora Collazos, A., y Bravo Montaña, E. (2017). Aislamiento de microorganismos electrogénicos con potencial para reducir cromo hexavalente. *Acta Biológica Colombiana*, 22(1), 27-36.
 - Neelson, K.H., & Rowe, A.R. (2016). Electromicrobiology: realities, grand challenges, goals and predictions. *Microbial Biotechnology*, 9(5), 595-600.
 - Niessen, J., Schröder, U., Harnisch, F., & Scholz, F. (2005). Gaining electricity from in situ oxidation of hydrogen produced by fermentative cellulose degradation. *Letters in Applied Microbiology*, 41(3), 286-290.
 - Oh, S.T., Kim, J.R., Premier, G.C., Lee, T.H., Kim, C., y Sloan, W.T. (2010). Sustainable wastewater treatment: how might microbial fuel cells contribute. *Biotechnology Advances*, 28(6), 871-881.
 - Pandey, P., Shinde, V.N., Deopurkar, R.L., Kale, S.P., Patil, S.A., y Pant, D. (2016). Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*, 168, 706-723.
 - Papaharalabos, G., Greenman, J., Melhuish, C., Santoro, C., Cristiani, P., Li, B., y Ieropoulos, I. (2013). Increased power output from micro porous layer (MPL) cathode microbial fuel cells (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(26), 11552-11558.
 - Parameswaran, P., Bry, T., Popat, S.C., Lusk, B. G., Rittmann, B.E., y Torres, C.I. (2013). Kinetic, electrochemical, and microscopic characterization of the thermophilic, anode-respiring bacterium *Thermincola ferriacetica*. *Environmental Science & Technology*, 47(9), 4934-4940.

- Park, J. H., Kang, H. J., Park, K. H., y Park, H. D. (2018). Direct interspecies electron transfer via conductive materials: A perspective for anaerobic digestion applications. *Bioresource Technology*, 254, 300-311.
- Pascual, M.M. (2012). Una visión global de la crisis energética. *El Ecologista*, (73), 30-34.
- Patil, S. A., Hägerhäll, C., & Gorton, L. (2012). Electron transfer mechanisms between microorganisms and electrodes in bioelectrochemical systems. *Advances in Chemical Bioanalysis*. Springer, Cham, 71-129.
- Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S.D., Verhaege, M., y Verstraete, W. (2004). Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(9), 5373-5382.
- Rabaey, K., y Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnology*, 23(6), 291-298.
- Rabaey, K., Angenent, L., y Schröder, U. (2010). *Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application*. IWA Publishing, London, UK. 524 pp.
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., y Oh, S.E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: a review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745-756.
- Reguera, G., Nevin, K.P., Nicoll, J.S., Covalla, S.F., Woodard, T.L., y Lovley, D.R. (2006). Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(11), 7345-7348.
- Reimers, C.E., Tender, L.M., Fertig, S., y Wang, W. (2001). Harvesting energy from the marine sediment– water interface. *Environmental Science & Technology*, 35(1), 192-195.
- Romeva, C.R. (2015). *Facturas energéticas de los combustibles fósiles: dependencias y desigualdades*. Editorial Octaedro, Barcelona España, 377 pp.

- Richter, H., McCarthy, K., Nevin, K.P., Johnson, J. P., Rotello, V.M., y Lovley, D.R. (2008). Electricity generation by *Geobacter sulfurreducens* attached to gold electrodes. *Langmuir*, 24(8), 4376-4379.
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., y Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, 225-244.
- Santos, T.C., Silva, M.A., Morgado, L., Dantas, J.M., & Salgueiro, C.A. (2015). Diving into the redox properties of *Geobacter sulfurreducens* cytochromes: a model for extracellular electron transfer. *Dalton Transactions*, 44(20), 9335-9344.
- Simonte F., Sturm G., Gescher J., y Sturm-Richter K. (2017). Extracellular Electron Transfer and Biosensors. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1-24.
- Solís, M., Solís, A., Pérez, H.I., Manjarrez, N., y Flores, M. (2012). Microbial decolouration of azo dyes: a review. *Process Biochemistry*, 47(12), 1723-1748.
- Srikanth, S., Pavani, T., Sarma, P.N., y Mohan, S.V. (2011). Synergistic interaction of biocatalyst with bio-anode as a function of electrode materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2271-2280.
- Stams, A.J., De Bok, F.A., Plugge, C.M., Eekert, V., Miriam, H.A., Dolfing, J., y Schraa, G. (2006). Exocellular electron transfer in anaerobic microbial communities. *Environmental Microbiology*, 8(3), 371-382.
- Tender, L.M., Gray, S.A., Groveman, E., Lowy, D.A., Kauffman, P., Melhado, J., Tyce R.T., Flynn, D., Petrecca, R., y Dobarro, J. (2008). The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, 179(2), 571-575.
- Thomas, Y.R., Picot, M., Carer, A., Berder, O., Sentieys, O., y Barrière, F. (2013). A single sediment-microbial fuel cell powering a wireless telecommunication system. *Journal of Power Sources*, 241, 703-708.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables.

https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf.

- Wang, H., Park, J.D., y Ren, Z.J. (2015). Practical energy harvesting for microbial fuel cells: a review. *Environmental Science & Technology*, 49(6), 3267-3277.
- Winfield, J., Gajda, I., Greenman, J., y Ieropoulos, I. (2016). A review into the use of ceramics in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 215, 296-303.
- Yilmazel, Y. D., Zhu, X., Kim, K.Y., Holmes, D.E., y Logan, B.E. (2018). Electrical current generation in microbial electrolysis cells by hyperthermophilic archaea *Ferroglobus placidus* and *Geoglobus ahangari*. *Bioelectrochemistry*, 119, 142-149.
- Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H., y Jin, T. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4427-4435.
- Zhou, T., Han, H., Liu, P., Xiong, J., Tian, F., y Li, X. (2017). Microbial Fuels Cell-Based Biosensor for Toxicity Detection: A Review. *Sensors*, 17(10), 2230.