



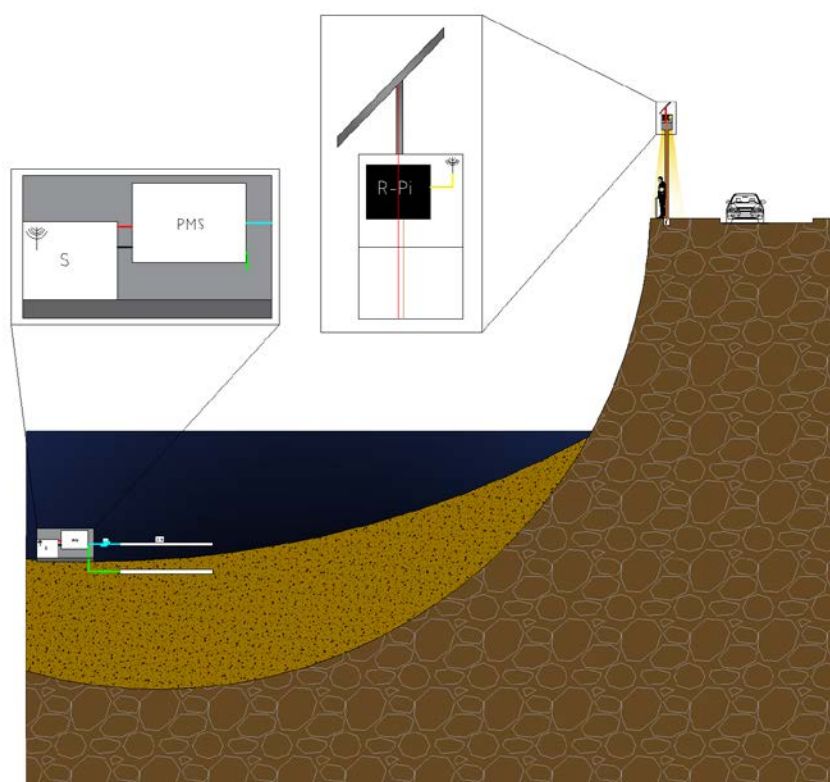
# Grado en Biología

## Memoria del Trabajo de Fin de Grado

**Revisión bibliográfica. Generación y almacenamiento de electricidad mediante sistemas biológicos: células de combustible microbiano**

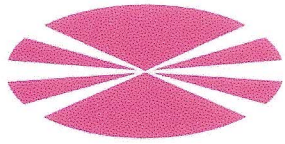
Revisión bibliográfica. Xeración e almacenamento de electricidade mediante sistemas biolóxicos: células de combustible microbiano

Literature review. Generation and storage of electricity through biological systems: microbial fuel cells



**Naomi Diz Rosales**  
**27 Julio 2017**

Dirigido por: Dr. Óscar Cabeza Gras/Dra. Montserrat Domínguez Pérez



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

**D. Oscar Cabeza Gras y Dña. Montserrat Domínguez Pérez autorizan la presentación del trabajo de fin de grado “Revisión bibliográfica. Generación y almacenamiento de electricidad mediante sistemas biológicos: células de combustible microbiano” presentado por Naomi Diz Rosales para su defensa ante el tribunal calificador.**

Dr. Oscar Cabeza Gras

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

En A Coruña a 19 de xullo de 2017

## Resumen

Debido a la mayor concienciación actual del elevado ritmo de consumo de energía y grado de contaminación asociado, se ha incrementado la investigación de energías renovables. Una alternativa potencialmente interesante son las células de combustible microbiano o *microbial fuel cells (MFCs)*, que generan electricidad que puede ser almacenada o utilizada en diversas aplicaciones, gracias al aprovechamiento de la actividad de una fuente biológica. Desde su origen, en 1911, cuando Michael Cresse Potter empleó microorganismos para la consecución de electricidad, diversos estudios enriquecieron paulatinamente el campo, incrementándose entre finales del siglo XX y comienzos del siglo XXI. En la presente revisión bibliográfica se estudia el estado actual de investigación en este ámbito, valorando las características, aplicaciones y limitaciones de cuatro configuraciones de *MFCs*, para determinar su potencial uso como tecnología renovable en base a su sostenibilidad energética. Por último, se concluye que, de las expuestas, la célula de combustible microbiano sedimentaria o *sediment microbial fuel cell (SMFC)* es la alternativa más sostenible y se presentan los parámetros que condicionan su rendimiento, proponiéndose vías de investigaciones futuras que contribuyan a su mejoría y mayor aplicación en la vida real.

## Palabras clave

Célula de combustible microbiano (*MFC*), célula de combustible microbiano sedimentaria (*SMFC*), generación de electricidad, microorganismo, sostenibilidad.

## Resumo

Debido á maior concienciación actual do elevado ritmo de consumo de enerxía e grao de contaminación asociado, aumentou a investigación de enerxías renovables. Unha alternativa potencialmente interesante son as células de combustible microbiano ou *microbial fuel cells (MFCs)*, que xeran electricidade que pode ser almacenada ou empregada en diversas aplicacións, grazas ao aproveitamento da actividade dunha fonte biolóxica. Dende a súa orixe, en 1911, cando Michael Cresse Potter empregou microorganismos para a consecución de electricidade, diversos estudos enriqueceron paulatinamente o campo, incrementándose entre finais do século XX e comezos do século XXI. Na presente revisión bibliográfica estúdase o estado actual de investigación neste ámbito, valorando as características, aplicacións e limitacións de catro configuracións de *MFCs*, para determinar o seu potencial uso como tecnoloxía renovable en base a súa sustentabilidade enerxética. Por último, conclúese que, das expostas, a célula de combustible microbiano sedimentaria ou *sediment microbial fuel cell (SMFC)* é a alternativa máis sostible e preséntanse os parámetros que condicionan o seu rendimento, propoñéndose vías de investigación futuras que contribúan a súa melloría e maior aplicación na vida real.

## Palabras clave

Célula de combustible microbiano (*MFC*), célula de combustible microbiano sedimentaria (*SMFC*), xeración de electricidade, microorganismo, sustentabilidade.

## Summary

Due to the greater current awareness about energy consumption and the pollution associated, research on renewable energies has increased. A potentially interesting alternative are microbial fuel cells (MFCs), which generate electricity that can be storage or used in a variety of applications thanks to the activity exploitation of a biological source. Since its origin, around 1911, when Michael Cresse Potter used microorganisms to produce electricity, diverse studies have been gradually developed, increasing between the end of XX century and the beginning of XXI century. In this literature review, the actual state of investigation in this area is being presented, considering the characteristics, applications and limitations of four MFC configurations. The objective is to determine their potential usage as renewable technology considering their energy sustainability. Lastly, it is concluded that, among the previously explained devices, the sediment microbial fuel cell (SMFC) is the most sustainable alternative, and the parameters conditioning its efficiency are also being presented, as well as the proposition of future investigation ways to contribute to its improvement and greater application in real life.

## Key words

Microbial fuel cell (MFC), sediment microbial fuel cell (SMFC), electricity generation, microorganism, sustainability.

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Historia de la bioelectricidad ligada a las células de combustible microbiano .....	1
1.2. Funcionamiento de las células de combustible microbiano y ejemplos de variedades existentes .....	2
1.3. Interés del estudio de las células de combustible microbiano .....	4
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Material y métodos</b> .....	<b>6</b>
<b>4. Estado del estudio de las células de combustible microbiano</b> .....	<b>8</b>
<b>5. Caracterización de los dispositivos generadores de electricidad</b> .....	<b>10</b>
5.1. Célula de biocombustible enzimática o <i>enzymatic biofuel cell (EBFC)</i> .....	10
5.2. Célula de electrohidrogenación microbiana o <i>microbial electrohydrogenesis cell (MEC)</i> .....	11
5.3. Célula de combustible microbiano sedimentaria o <i>sediment microbial fuel cell (SMFC)</i> .....	12
5.4. Célula de combustible microbiano fotosintética o <i>photosynthetic microbial fuel cell (PMFC)</i> .....	13
<b>6. Parámetros condicionantes del rendimiento en dispositivos SMFCs, vías de investigación, escalado y futuras aplicaciones</b> .....	<b>14</b>
6.1. Parámetros condicionantes de los dispositivos SMFCs y vías de investigación	14
6.2. Idealización de un caso con aplicaciones científicas .....	16
<b>7. Conclusiones/Conclusión/Conclusions</b> .....	<b>18</b>
7.1. Conclusiones .....	18
7.2. Conclusión .....	18
7.3. Conclusions .....	19
<b>8. Agradecimientos</b> .....	<b>19</b>
<b>9. Bibliografía</b> .....	<b>20</b>
<b>ANEXO I. Componentes EBFCs</b> .....	<b>26</b>
<b>ANEXO II. Componentes MECs</b> .....	<b>29</b>
<b>ANEXO III. Componentes SMFCs y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas</b> .....	<b>32</b>
<b>ANEXO IV. Componentes PMFCs</b> .....	<b>36</b>

## 1. Introducción

Las células de combustible microbiano o *microbial fuel cells* (*MFCs*), son dispositivos bioelectroquímicos basados en la utilización de microorganismos (e.g. **bacterias exoelectrogénicas**<sup>1</sup>) para generar electricidad a través de la oxidación de materia orgánica (Corbella et al. 2017). La corriente producida puede ser almacenada o utilizada directamente en diversas aplicaciones, concretadas a lo largo de esta revisión.

### 1.1. Historia de la bioelectricidad ligada a las células de combustible microbiano

La capacidad de los seres vivos de generar y almacenar electricidad ha sido registrada desde antiguo. Sin embargo, el concepto “**electricidad animal**”<sup>2</sup>, se atribuye a Luis Galvani, considerado el padre de la bioelectricidad por los experimentos realizados en 1780 (Santoro et al. 2017), en los que observó las contracciones musculares producidas en ranas muertas ante una “chispa eléctrica” aplicada en los nervios de sus extremidades (Galvani 1791). No obstante, Alessandro Volta mostró disconformidad con las conclusiones de Galvani, afirmando que la “electricidad animal” era consecuencia del metal que conectaba los músculos con los nervios de los especímenes. A raíz de esta polémica, Volta realizó experimentos de generación de electricidad por contacto de metales, fruto de los cuales construyó un dispositivo que constituiría una de las primeras baterías (Volta 1800).

Durante el inicio del siglo XIX continuaron los avances en los sistemas electroquímicos generadores de electricidad (Santoro et al. 2017) debido a que, desde los experimentos realizados por Galvani, se comprobó el carácter bioelectroquímico de numerosas rutas biológicas (Davis and Higson 2007). Uno de los primeros progresos en la generación de electricidad por procesos biológicos vino de mano de Michael Cresse Potter (Davis and Higson 2007). Sus estudios marcaron el inicio de las células de combustible microbiano, al utilizar microbios para generar electricidad a principios del siglo XX (Santoro et al. 2017). Potter diseñó una celda galvánica cuyo ánodo captaba los electrones liberados por el metabolismo microbiano para, posteriormente, transferirlos a un condensador, obteniendo como resultado de sus experimentos una diferencia de potencial generada por los cultivos de levadura o de *Escherichia coli* empleados (Potter 1911).

David Cohen desarrolló en los años 30, células de combustible microbiano que generaban potenciales superiores a 35 V proporcionando mayor cantidad de compuestos orgánicos al medio, y limitando la presencia de oxígeno (que puede reducir la eficacia del sistema), a través de la introducción de sustancias inorgánicas u orgánicas como la benzoquinona (Thirty-second ... 1931). A raíz de los trabajos de Cohen y de las investigaciones de Davis y Yarborough, se construyó la primera *MFC* verdadera en 1931 (Arends and Verstraete 2012).

En los años 60 se popularizaron las células de combustible microbiano por la NASA, que pretendía, mediante su uso, obtener electricidad a partir de residuos orgánicos durante las misiones espaciales (Santoro et al. 2017). Desde entonces, el estudio se redujo, hasta que, durante la mitad de 1990, se incrementó de nuevo para su utilización en el tratamiento de aguas residuales (Arends and Verstraete 2012). El interés por las *MFCs* ha aumentado considerablemente en los últimos años, como se refleja en las referencias de la presente revisión.

---

<sup>1</sup>**Bacterias exoelectrogénicas:** especies bacterianas caracterizadas por la capacidad de transferencia extracelular de electrones a los electrodos (Ren et al. 2017).

<sup>2</sup>**Electricidad animal:** término acuñado por Galvani que describe la generación de una corriente eléctrica llevada a los músculos por los nervios, actuando en conjunto como un circuito eléctrico (Galvani 1791).



## 1.2. Funcionamiento de las células de combustible microbiano y ejemplos de variedades existentes

Las *MFCs*, como el resto de las baterías, constan de tres componentes fundamentales: el ánodo, el cátodo y el electrolito (Logan and Regan 2006). Por tanto, habrá una cámara catódica y una cámara anódica separadas por una membrana que impida el intercambio de oxígeno entre ambas (Mercuri et al. 2016). Esto se debe a que, si el oxígeno estuviese en contacto con el ánodo, los electrones generados se emplearían en su reducción, obteniendo menos rendimiento eléctrico (Helder 2012). Además, ánodo y cátodo están conectados a través de un circuito externo (con una resistencia), por donde fluyen los electrones hasta alcanzar al cátodo, donde se encuentra su aceptor terminal (Corbella et al. 2017). Por cada electrón que se genera, también ha de transportarse un protón al cátodo, y por ello es necesario un electrolito o solución acuosa que establezca la corriente (Logan and Regan 2006).

La base del funcionamiento es la respiración celular microbiana. Las bacterias pueden oxidar sustratos reducidos, produciéndose electrones, que son transferidos a lo largo de una serie de enzimas respiratorias en forma de nicotinamida adenina dinucleótido de hidrógeno o NADH. Este flujo por la cadena respiratoria genera un gradiente de protones a través de la membrana, debido a su paso por las enzimas, de modo que los protones vuelven a la célula a través de la enzima ATP sintasa y se genera adenosín trifosfato o ATP, que proporciona la energía que precisan. Por último, los electrones se liberan a un aceptor terminal, como puede ser el nitrato, oxígeno o sulfato (Logan and Regan 2006). Tener presente este funcionamiento biológico es fundamental para mejorar los dispositivos, como, por ejemplo, probando diversos aceptores terminales de electrones con un potencial redox similar al oxígeno, ya que, parte de la efectividad de la célula de combustible microbiano, viene determinada por el gradiente redox entre cátodo y ánodo (Logan and Regan 2006). Sin embargo, el sustrato, los materiales de los electrodos y los microorganismos seleccionados, también tendrán una vital influencia en el rendimiento, y es que, si bien el género predominante en estos dispositivos es *Geobacter*, también hay datos experimentales con otros géneros, tales como *Bacillus*, *Clostridium* y *Shewanella* (Paitier et al. 2017).

Sobre este esquema de dispositivo se han desarrollado diferentes vías de investigación, de modo que esta revisión recopila cuatro configuraciones de *MFCs* expuestas a continuación.

**1-** La **célula de biocombustible enzimática** o **enzymatic biofuel cell (EBFC)** es un sistema electroquímico que genera electricidad a través del uso de enzimas redox como catalizadores en cátodo y ánodo (Galindo-de-la-Rosa et al. 2017). Estas enzimas permiten transformar la energía bioquímica de organismos vivos en electricidad (Song et al. 2014). El mecanismo se basa en el flujo de electrones entre enzima y electrodo, de modo directo o con el empleo de un mediador (Wen and Eychmüller 2016). Las enzimas pueden oxidar biocombustibles como la glucosa y reducir oxidantes como el oxígeno, de modo que la electricidad procede de sustancias renovables (Prasad et al. 2014) (**Anexo I. Componentes EBFCs**).

**2-** La **célula de electrohidrogenación microbiana** o **microbial electrohydrogenesis cell (MEC)** “combina la tecnología *MFC* con electrolisis” (Kumar et al. 2017). La similitud con las *MFCs*, es el empleo de bacterias en el ánodo para la oxidación en condiciones de

anaerobiosis de sustratos como azúcares, ácidos orgánicos o más complejos, como las aguas residuales (Kumar et al. 2017). Los electrones resultantes fluyen hasta alcanzar los aceptores terminales del cátodo (Rivera et al. 2017). La diferencia radica en que se obtiene gas  $H_2$  en lugar de electricidad de modo directo (Kumar et al. 2017) (**Anexo II. Componentes MECs**). Si bien, con el empleo de gas  $H_2$  se puede obtener energía posteriormente.

3- La **célula de combustible microbiano sedimentaria** o ***sediment microbial fuel cell (SMFC)*** es un sistema bioelectroquímico (Domínguez-Garay et al. 2016), caracterizado por la utilización del gradiente de potencial existente entre los sedimentos y el agua superficial oxigenada que se da en muchos medios naturales (Moqsud et al. 2015). Para poder obtener electricidad, el ánodo se introduce en el sedimento, donde se sucederán las reacciones de oxidación en condiciones anóxicas y el cátodo se dispone flotando sobre el agua, para que se lleve a cabo la reducción de oxígeno u otros aceptores (Tommasi and Lombardelli 2017) (**Anexo III. Componentes SMFCs y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas**). Este sistema aprovecha que, en los medios naturales, la materia orgánica que oxidan los microorganismos nativos del sedimento se renueva, proporcionando un flujo continuo a los ánodos (Ewing et al. 2017). Además, al instalar los electrodos en entornos naturales como el océano, se pueden emplear las especies microbianas electroactivas que residen en estos hábitats (Velasquez-Orta et al. 2017). También se puede hacer referencia a las células de combustible microbiano bentónicas o ***benthic microbial fuel cells (BMFCs)*** dentro de las SMFCs, en referencia a que el biofilm electroactivo se puede obtener de ambientes como suelos y sedimentos de mar o agua dulce (de Dios et al. 2014).

4- La **célula de combustible microbiano fotosintética** o ***photosynthetic microbial fuel cell (PMFC)*** es una variedad de célula solar microbiana o ***microbial solar cell (MSC)*** basada en el empleo de microalgas o microorganismos presentes en la rizosfera de las plantas que transforman la energía procedente del sol en electricidad. Las plantas, debido al metabolismo autótrofo, producen biomasa con la energía solar, consumiendo el 40% y exudando el resto al entorno de la raíz o rizosfera (Nitisoravut and Regmi 2017). Estos exudados pueden ser utilizados directamente en el ánodo por bacterias electroactivas, presentes en las poblaciones microbianas de la rizosfera (Moqsud et al. 2015). Los electrones, fruto de la oxidación de los rizodepósitos, se transportan al cátodo donde se produce la reducción de un aceptor como el oxígeno y se genera agua (Wetser et al. 2017) (**Anexo IV. Componentes PMFCs**). También se pueden integrar en estos dispositivos microalgas, y en ambos casos cabe destacar que, a través de la actividad fotosintética, se puede eliminar el dióxido de carbono que esté presente en el cátodo (Uggetti and Puigagut 2016). En todo caso, no es necesario un sustrato orgánico exógeno como fuente de energía, ya que esta radica en la energía luminosa necesaria para la activación de la cadena de transferencia de electrones fotosintética (Zou et al. 2009).



### 1.3. Interés del estudio de las células de combustible microbiano

La población mundial continúa aumentando con la sucesión de los años, de modo que, tras análisis realizados, se ha llegado a la predicción de que con una certeza del 95%, en 2030 oscilará entre los 8,4 y 8,7 mil millones, y entre los 9,4 y 10,2 mil millones en 2050 (United Nations 2017). De esta situación, deriva una elevada demanda de energía, proporcionada en su mayoría por el empleo de combustibles fósiles, que ocasionan problemas de carácter ambiental, social y económico (Rittmann 2008). De hecho, tras contactar con el departamento de Estadísticas Energéticas de las Naciones Unidas durante la elaboración de la revisión, informaron que la energía producida por los combustibles fósiles en 2014 (último año registrado hasta el momento) fue de 16.396.065 TW·h, representando un 68,58% de la energía total producida ese año (23.906.233 TW·h). Con su agotamiento, se podría desencadenar una lucha geopolítica para adquirir las reservas restantes, produciéndose perturbaciones económicas y un incremento de conflictos, a lo que se une el impacto negativo, sobre el medio ambiente y la salud, de las emisiones del CO<sub>2</sub> producido por su consumo (Rittmann 2008). Actualmente el ritmo de crecimiento no alcanza la sostenibilidad, definida como “la persistencia sobre un futuro aparentemente indefinido de ciertas características necesarias y deseadas del sistema sociopolítico y su entorno natural” (Robinson et al. 1990). Es decir, una tecnología se considera sostenible si atiende tanto al factor ambiental como al social, pues el progreso de la misma no puede conducir a desequilibrios económicos u otros impactos sociales. Esta situación, justifica la necesidad de otras fuentes de energía alternativas, que se ve reflejada en las reuniones realizadas recientemente sobre ello (Dincer 2011). Entre los años 2015 y 2016, se han celebrado las Conferencias de las Naciones Unidas para tratar de establecer el objetivo de una economía mundial con baja presencia en carbono para el año 2050 (Tommasi and Lombardelli 2017). Las energías renovables son una de las posibles soluciones (Dincer 2011), y algunas ya se emplean actualmente como la solar, eólica, hidráulica, geotérmica...

Uno de los principales retos radica en la legislación. Según algunos autores, los cambios legislativos aplicados en España en 2012 han provocado un estancamiento en la introducción de nuevas fuentes renovables (de Alegría et al. 2016). Sin embargo, desde el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, se informó de que España había superado el consumo de energía renovable previsto para ese año, un 17,3% frente al 12,1% fijado (Real Decreto ... 2017). También desde la Secretaría de Estado de Energía se publicó la necesidad de un impulso a la “penetración de nueva capacidad renovable en el sistema eléctrico”, para alcanzar el objetivo de consumo de energía final en 2020. Por ello, se anunció la subasta de potencial de distintas tecnologías renovables (Real Decreto ... 2017), como la eólica, fotovoltaica y otras (Resolución ... 2017). Estos cambios también suceden en los demás países miembros de la Unión Europea desde la ratificación del Protocolo de Kyoto, en 2005 (de Alegría et al. 2016). Sin embargo, cualquier prototipo de tecnología alternativa, deberá ser evaluada previamente para verificar que es renovable, sostenible y disponible (Helder 2012). Por ello, es imprescindible el análisis de sostenibilidad energética de cualquier sistema de potencial uso, la cual se cuantifica considerando el tiempo necesario para obtener la energía invertida en la construcción del dispositivo (Tommasi and Lombardelli 2017). Consecuentemente, la producción de biomasa y bioelectricidad parece una opción potencialmente interesante para la “energía verde del futuro” (Nitisravut and Regmi 2017).

Las células de combustible microbiano permiten la obtención de bioelectricidad a partir de materia orgánica o biomasa en un proceso que no ocasiona emisiones de gases contaminantes (Rittmann 2008), y pueden emplearse en combinación con diferentes procesos, como, por ejemplo, el tratamiento en aguas residuales (Logan and Regan 2006).

La materia orgánica presente en estas aguas podría utilizarse para generar energía que alimente al propio tratamiento, por ejemplo, a las bombas necesarias para la aireación durante el proceso (Krieg et al. 2017). Para ello, las *MFCs* se pueden integrar en la infraestructura en la etapa de pretratamiento de las aguas residuales (Saba et al. 2017), siendo el principal problema para la obtención de una alta eficacia los materiales necesarios y consecuentemente el escalado (Logan and Regan 2006). Así mismo, se ha propuesto su utilización para la degradación de sustancias como hidrocarburos (Rittmann 2008) y metales pesados. Por ejemplo, el cobre en exceso es una amenaza en agricultura, por ello es importante eliminarlo de las aguas o corrientes residuales. Si en el cátodo se introduce  $\text{Cu}^{2+}$  este se reducirá a  $\text{Cu}$  y además puede mejorar el rendimiento de la *MFC*, al competir con el oxígeno (Ter Heijne et al. 2010).

Las *MFCs* también podrían emplearse en viviendas individuales, aunque la producción de energía sería insuficiente para recuperar el gasto invertido, si bien, podrían ser útiles en áreas donde no es posible la construcción de tanques sépticos (Logan and Regan 2006).

Así mismo, también pueden contribuir al campo de la ciencia, como, por ejemplo, alimentando a sensores ambientales y dispositivos de difícil acceso, como los situados en aguas fluviales y profundas, y poder obtener consecuentemente un mayor número de parámetros físicos, químicos y biológicos de estos ecosistemas (Logan and Regan 2006).

Por último, las *MFCs* también proporcionan beneficios en el ámbito educativo, pues los alumnos muestran mucho interés por el proceso de generación de electricidad mediante el empleo de microorganismos, y de este modo, pueden comprender conceptos relacionados con los procesos de la respiración celular, ecología microbiana, electroquímica y de desarrollo de los materiales (Logan and Regan 2006).

Sin embargo, presentan limitaciones, ya que, aunque la producción de energía ha aumentado cada año (Logan and Regan 2006), aún tienen que darse avances para mejorar la rapidez en la producción y en su viabilidad comercial (Rittmann 2008) y para ello son necesarias las revisiones que recopilen las limitaciones, viabilidad y propuestas para continuar con su desarrollo.

## 2. Objetivos

En esta revisión se realiza un análisis de la sostenibilidad energética estudiando las aplicaciones y limitaciones de cada variedad. No se compararán los dispositivos en base a las densidades de corriente obtenidas, puesto que las configuraciones y condiciones experimentales entre dispositivos y dentro de cada dispositivo son muy variables, y, por tanto, estos valores solo se citarán para obtener un marco orientativo. En consecuencia, los objetivos a seguir serán los expuestos a continuación.

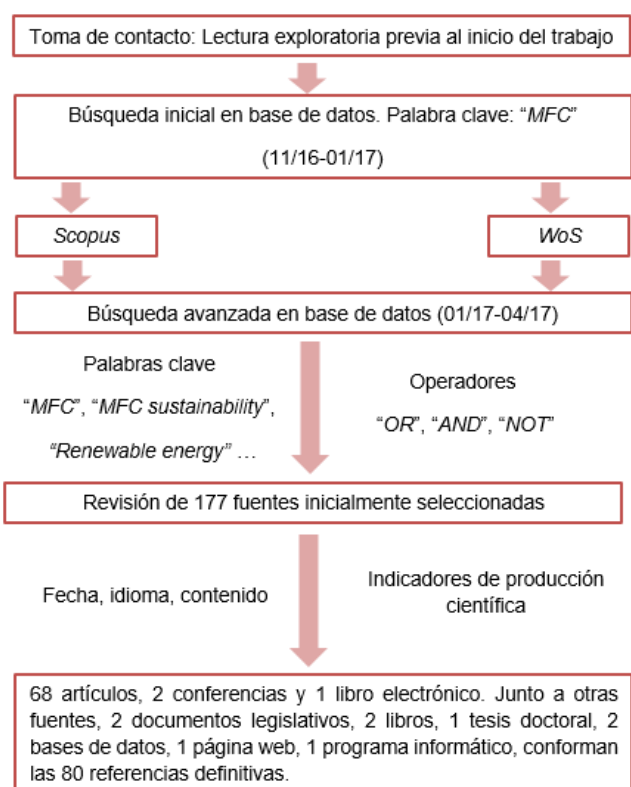
- Investigación del estado del estudio de las *MFCs* y variedades.
- Caracterización de las variedades *EBFCs*, *MECs*, *SMFCs* y *PMFCs*, con el fin de recopilar sus avances, potenciales máximos, aplicaciones, limitaciones, líneas de investigación y analizar su sostenibilidad teórica.
- Recopilación y análisis de los parámetros para optimización del dispositivo estudiado de mayor sostenibilidad teórica a corto plazo.
- Idealización y discusión de un caso con aplicaciones en el campo científico.

### 3. Material y métodos

Este TFG está orientado en el marco de una revisión bibliográfica. Consecuentemente, se ha realizado una búsqueda y análisis de documentos científicos relacionados con el campo de las *MFCs*. Los materiales empleados fueron simples, tales como un ordenador con conexión a internet, bases de datos, fundamentalmente *Scopus* y *Web of Science (WoS)*, los artículos seleccionados producto del proceso de recopilación bibliográfica, y otras fuentes tal y como se aprecia en la parte inferior de la **Figura 1**.

La metodología comprendió un total de seis etapas. En primer lugar, debido al carácter interdisciplinar que subyace a estos dispositivos, fue necesario realizar una búsqueda inicial de términos físicos, químicos, bioquímicos y microbiológicos que aparecen constantemente en las fuentes consultadas, para realizar una reflexión más profunda de la información disponible. Consecuentemente, a lo largo de la revisión, se realizan aclaraciones de determinadas expresiones que puedan dificultar la lectura.

Posteriormente, se procedió a la recopilación bibliográfica, consistente en cinco etapas sucesivas. Tras una fase de toma de contacto y búsqueda inicial simple, se procedió a una búsqueda avanzada realizando un refinamiento con el uso de operadores. En esta



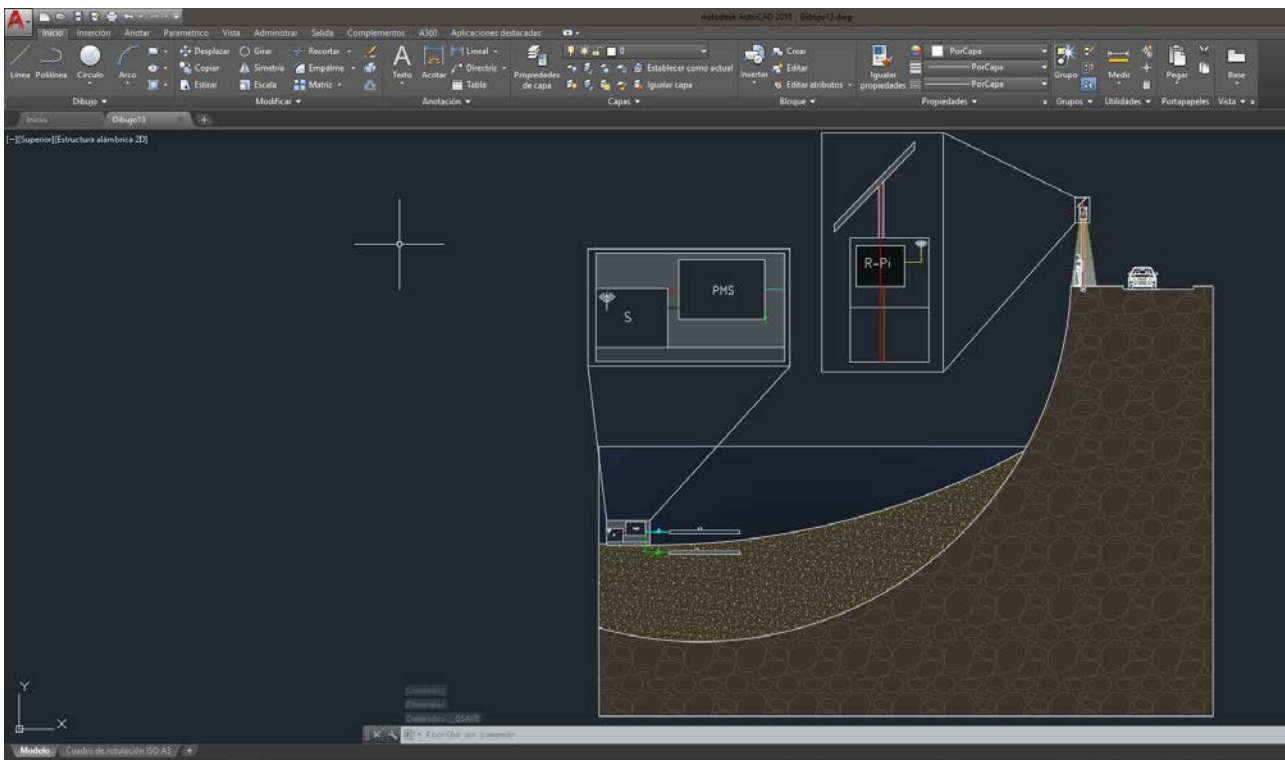
etapa se emplearon un total de 31 palabras clave expuestas a continuación en orden cronológico: "MFC", "MFC AND bioelectricity", "MFC AND history", "Renewable energy", "Renewable energy laws Spain", "MFC challenges", "MFC AND review", "MFC AND cellular respiration", "MFC AND wastewater", "MFC electrodes", "MFC sustainability", "Nanotubes electrodes", "MFC microorganisms", "MFC AND carbon nanotubes", "MSC", "PMFC", "SMFC OR BMFC", "MEC AND microbial electrohydrogenesis cell", "EBFC", "PMFC microalgae", "SMFC AND review", "SMFC NOT MFC", "SMFC AND corrosion", "SMFC AND copper", "SMFC AND electrodes", "Shewanella oneidensis", "Blooms Atlantic Ocean", "Deep water data", "Raspberry pi 3", "Weather buoys", "PMS AND SMFC".

**Figura 1. Metodología de búsqueda de información bibliográfica**

Cabe especificar, que, durante el proceso de búsqueda avanzada, se prestó especial atención a las revisiones bibliográficas, puesto que proporcionan información y referencias para adquirir un conocimiento más profundo en el campo. Resultado de las tres etapas previas, se obtuvo un total de 177 fuentes. En la cuarta etapa del proceso, se procedió a su revisión, realizando una lectura principalmente de los resúmenes y conclusiones para asignar un orden de prioridad según el contenido. Posteriormente, en la quinta etapa, se seleccionaron las fuentes con las que se realizó la redacción del proyecto, procedentes de las 177 y de otras, conforme se precisaban para alguna parte del trabajo. Para la selección,

atendiendo al orden establecido en la cuarta etapa, se primaron los redactados en inglés (a excepción de los documentos relacionados con el origen de la electricidad debido a su antigüedad), recientes en el tiempo y con mejores indicadores de producción científica, proporcionados por *Scopus* y *WoS*. De modo que, se seleccionaron los publicados en revistas con un percentil mayor a 80 o 85, así como también se comprobó el índice H de los autores y el número de citas (excepto en las referencias más recientes). Tras la quinta etapa, se obtuvo la bibliografía final para la redacción de la revisión. Finalmente, para la elaboración del apartado “Bibliografía” y las citas incluidas en el texto, se utilizó el formato “Name-Year” del Consejo de Editores Científicos o *Council of Science Editors (CSE)*, por ser utilizado en textos científicos y ser una de las asociaciones con más impacto en la edición científica (CSE 2014). De este modo, las referencias se elaboraron aplicando la normativa para cada tipo de fuente.

Por último, con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento de las configuraciones de esta revisión, se realizaron anexos con representaciones gráficas de los procesos fundamentales, eléctricos y biológicos, que fueron seleccionados de los artículos obtenidos, a excepción de la **Figura A** y **Figura C** del **Anexo III. Componentes SMFCs y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas**. Dicho esquema fue de elaboración propia a través del programa informático *AutoCAD 2018*. El procedimiento no fue complejo, ya que los pasos a seguir para su realización fueron reiterativos haciendo uso de las opciones proporcionadas por la barra de Inicio (**Figura 2**). Se seleccionaron los trazos, tonalidades, sombreado, y degradado necesarios, así como plantillas para la realización de figuras, como los vehículos o personas representadas. Al finalizar, para redimensionar cualquier elemento del esquema, se realizó a escala conservando las proporciones originales (AutoCAD...2017).



**Figura 2.** Captura de pantalla del proceso de elaboración del esquema, a través del programa *AutoCAD 2018*, representado en la figura A del **Anexo III. Componentes SMFCs y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas**



#### 4. Estado del estudio de las células de combustible microbiano

Para que se sigan sucediendo los avances en los dispositivos *MFCs*, es fundamental la realización de revisiones sobre el estado de estudio (Mercuri et al. 2016).

Se ha comprobado la existencia de una correlación positiva ( $r=0,94$ ,  $p<0,0001$ ) entre el total de publicaciones en la base de datos *Web of Science* con el número de artículos obtenidos con la palabra clave *MFC* (Mercuri et al. 2016). El auge en la investigación en este campo se muestra también en lo reciente de las publicaciones. Por ejemplo, de las clasificaciones presentes en bases de datos, como *Web of Science*, el mayor porcentaje de publicaciones acerca *MFCs* pertenece a 2016, con el 12,86% de los registros totales (Web of Science 2017). Es más, de los estudios publicados sobre sistemas bioelectroquímicos o *bio-electrochemical systems (BESs)*, los correspondientes a *MFCs* han representado en *Web of Science* más del 75% en 2016 (Santoro et al. 2017). Esto es fácilmente visible en las referencias de la presente revisión, pues de 61 fuentes bibliográficas relacionadas con las *MFCs*, un 52,46% se corresponden con las datadas entre 2016 y 2017. Las publicaciones recientes están predominadas por países como Estados Unidos, China, Corea del Sur y Japón, puesto que la inversión en I+D influye en una mayor producción de contenidos científicos. Sin embargo, también hay que considerar el interés específico de los gobiernos y empresas privadas que pueden invertir dinero en el desarrollo de *MFCs* (e.g. Brasil, tiene pocas publicaciones, pero cuentan con un investimento elevado del gobierno para el desarrollo de estos dispositivos) (Mercuri et al. 2016).

En cuanto a las fuentes de los artículos, hay variadas revistas según el parámetro de la *MFC* a estudiar. Con lo cual, las principales de esta revisión no tienen porqué ser necesariamente las principales en este campo de investigación, pues la búsqueda está sesgada según el propósito de cada trabajo, en este caso hacia la sostenibilidad. Las cinco principales fuentes de los artículos obtenidos fueron *Biosensors and Bioelectronics*, *Journal of Power Sources*, *Bioresource Technology*, *Environmental Science and Technology* y *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, todas por encima del percentil 89 y con un elevado número de citas (Scopus 2017), lo que indica su importancia en este campo.

Una vez conocido el estado de estudio de las *MFCs*, se procedió a la búsqueda de los principales países, instituciones y autores que contribuyen a los cuatro dispositivos objeto de este estudio. Para ello, se procedió al análisis de la información proporcionada por *Web of Science* y los resultados se organizaron en la **Tabla 1**. Al comparar los resultados con las referencias base de esta revisión, se observan similitudes y diferencias. La configuración con más coincidencias fue la *SMFC*, lo que podría explicarse a raíz de la orientación de este proyecto, con lo cual, para poder realizar comparaciones más robustas, es necesario un número elevado y equitativo de artículos de cada configuración. Si bien cabe mencionar, que la *PMFC*, obtuvo el segundo mayor número de resultados similares en el campo de autor, debido a la presencia, en las referencias empleadas, de uno de sus principales creadores, Strik. Además, otros autores presentes en al menos dos de las fuentes utilizadas de cada dispositivo son Helder, Buisman y Hamelers con respecto a las *PMFCs*, Ewing y Tender en las *SMFCs* y Logan, creador de las *MECs* e investigador con más presencia en las referencias acerca las *MFCs* (Web of Science 2017). Por último, con las cuatro configuraciones se comprobó la preponderancia de Estados Unidos (e.g. *EBFCs*), seguido de China, especialmente en las *SMFCs*, y Holanda, debido a la contribución de la Universidad de Wageningen al desarrollo de las *PMFCs*.

**Tabla 1.** Principales instituciones, países y autores de los dispositivos en estudio (Información proporcionada por *Web of Science* a 6 de julio de 2017). Se destacan las coincidencias con los resultados obtenidos del análisis de las referencias de la revisión.

<b>Dispositivo</b>	<b>Principales instituciones</b>	<b>Países principales</b>	<b>Principales autores</b>
<i>EBFC</i>	University Kentucky Nanjing University Florida International University Carnegie Mellon University	Estados Unidos China Corea del Sur Francia	Stevenson B Gai PP Bowman A Chen Y
<i>MEC</i>	Penn State University Harbin Institutes Technology Chinese Academy of Sciences Wageningen University	China Estados Unidos España Holanda	Logan BE Wang AJ Liu WZ Ren NQ
<i>SMFC</i>	Chinese Academy of Sciences Indian Institutes of Technology Washington State University Nanjing University of Technology	China Estados Unidos India Corea del Sur	Beyenal H Jiang HL Song TS Ghangrekar MM
<i>PMFC</i>	Max Planck Society University of Michigan Wageningen University Radboud University Nijmegen	Estados Unidos Holanda Alemania China	Ullsperger M Strik DPBTB Fitzgerald KD Taylor SF

(Web of Science 2017)



## 5. Caracterización de los dispositivos generadores de electricidad

### 5.1. Célula de biocombustible enzimática o *enzymatic biofuel cell (EBFC)*

Las *EBFCs* surgen en 1964 (Rasmussen et al. 2016) cuando Yahiro, Lee y Kimble idearon el primer dispositivo, llevando a cabo una investigación bioelectroquímica del sistema glucosa oxidasa de levadura como catalizador anódico y glucosa como combustible biológico (Yahiro et al. 1964).

Debido a las características estructurales y funcionales de estos dispositivos, tales como la fácil miniaturización, ligereza, ausencia de toxicidad y empleo de biocombustibles (e.g. glucosa), se podrían utilizar en múltiples aplicaciones (Wen and Eychmüller 2016). Está en estudio su empleo en dispositivos médicos para tratamiento de enfermedades, tales como la bradicardia (du Toit and Di Lorenzo 2015). De hecho, el grupo Cosnier, ha creado un **supercondensador**<sup>3</sup> (Rasmussen et al. 2016) híbrido que puede suministrar la potencia necesaria para un marcapasos o para neuroestimuladores (Agnès et al. 2014). Ya se han implantado estos dispositivos en organismos vivos como, ratas, cucarachas, caracoles y langostas, con lo que su estudio para mejora en medicina es de potencial interés (Rasmussen et al. 2016). Esto se debe a que las *EBFCs* podrían tener capacidad de producir electricidad en un ambiente similar al humano (Galindo-de-la-Rosa et al. 2017). Por ejemplo, se ha reportado que nuestro líquido lacrimal permite la generación de electricidad por la utilización de ascorbato y oxígeno (biocombustible y oxidante respectivamente) (Wen and Eychmüller 2016). Así mismo, pueden ser de utilidad como fuente energética en dispositivos portátiles (Rasmussen et al. 2016), como el *mp3* vendido por la compañía Sony, que se alimentaba mediante una conexión en serie de *EBFCs* (Wen and Eychmüller 2016).

Sin embargo, presentan limitaciones, como la inestabilidad enzimática, baja velocidad de transferencia de electrones entre enzima y electrodos (Wen and Eychmüller 2016), área superficial del electrodo reducida y baja conductividad del mismo, que se ve agravado porque los centros activos de las enzimas se localizan habitualmente en el interior de matrices proteicas, dificultando la transferencia de electrones (Prasad et al. 2014). De hecho, los mayores valores registrados son de un voltaje de circuito abierto u *open circuit voltage (OCV)* de 1,2 V, una densidad de potencia de 2,27 mW·cm<sup>-2</sup> y una densidad de corriente de 1,89 mA·cm<sup>-2</sup> en una *EBFC* de glucosa como biocombustible y oxígeno, empleando electrodos híbridos nanoestructurados con nanotubos (Wen and Eychmüller 2016). Los nanotubos de carbono son materiales de carbono cilíndricos, de amplia superficie, químicamente inertes, mecánicamente estables y con excelente conductividad eléctrica, que complementan otros materiales y pueden favorecer el establecimiento de la comunidad microbiana y su mayor rendimiento (Hindatu et al. 2017). Además, en estudios previos, se comprobó que no disipaban energía, por ejemplo, en forma de calor (Frank et al. 1998).

---

<sup>3</sup>**Supercondensador:** dispositivo electroquímico que se puede definir como un “puente entre baterías y condensadores clásicos debido a sus propiedades para almacenar altas densidades de energía combinadas con rápidos ciclos de carga-descarga” (Agnès et al. 2014).

Pese a que esta tecnología tiene potencial para ser renovable y sostenible, no es posible aún la utilización completamente eficiente de *EBFCs* fuera de laboratorio por una baja densidad de potencia y duración corta del suministro (Wen and Eychmüller 2016). La viabilidad comercial de las *EBFCs* aún no es real, por la baja estabilidad (Rasmussen et al. 2016) unido a un elevado coste, fruto de los materiales de los electrodos, de la membrana (Tommasi and Lombardelli 2017), y de los mediadores de electrones empleados que aún se necesitan para mejorar la transferencia (Rasmussen et al. 2016). Por ello, deben seguir realizándose investigaciones para la consecución de una sostenibilidad real e implementación en el mercado. Además del desarrollo de los bioelectrodos nanoestructurados, es necesario investigar la utilización de microorganismos termófilos, ya que sus enzimas presentan mayor estabilidad a temperatura ambiente, así como continuar con la investigación en el campo de la ingeniería enzimática y tecnología de biología sintética, que permitan la obtención de nuevas enzimas de mayor actividad y vías de transferencia de electrones directas más eficientes (Rasmussen et al. 2016).

## 5.2. Célula de electrohidrogenación microbiana o *microbial electrohydrogenesis cell* (MEC)

Su desarrollo comienza en el año 2005 debido a los experimentos llevados a cabo por Liu, Grot y Logan, a raíz de los cuales, presentaron un sistema de producción directa de hidrógeno a través de los protones y electrones generados por la oxidación bacteriana de materia orgánica (Liu et al. 2005). Desde entonces, su estudio se ha incrementado, debido a que sus posibles aplicaciones generan muchas perspectivas en la degradación de aguas residuales (Rivera et al. 2017) al convertir los residuos en productos aprovechables, como  $H_2$ . Además, su demanda se está incrementando cada vez más, por ejemplo, en industrias químicas o de fertilizantes (Lu and Ren 2016).

Sin embargo, estos dispositivos todavía presentan limitaciones que disminuyen su posible presencia en el mercado. La reacción por la cual los electrones, producto de la actividad de los microorganismos o biofilm del ánodo, se transfieren al cátodo, donde actúan reduciendo  $H$  a  $H_2$ , es un proceso termodinámicamente no espontáneo y por ello se debe suplementar con voltaje de modo externo para que se lleve a cabo (Kumar et al. 2017). Además, el rendimiento de las MECs, es menor cuanto mayor es el reactor de trabajo, debido a la baja relación de la superficie del electrodo en proporción al mismo, a la elevada resistencia causada por los electrodos de carbono empleados generalmente y a la mala transferencia de electrones en reactores de mayor tamaño (Guo et al. 2017). Se cree que los mayores registros alcanzados, han sido de  $50 \text{ LL}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ <sup>4</sup> en un reactor de volumen menor a 100 ml y de  $2,8 \text{ LL}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  en un reactor de 560 mL, mientras que para volúmenes de reactor de 1L o mayores no se ha excedido los  $1 \text{ LL}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  producidos (Guo et al. 2017). Esto probaría que a mayor volumen del reactor se obtiene una menor producción. Si bien, se ha comprobado experimentalmente, que mediante un reactor de 1 L de diseño tubular de doble cámara, ánodo de fibra de acero inoxidable y cátodo de platino recubierto con malla de titanio, se puede llegar a producir una **densidad de corriente volumétrica**<sup>5</sup> de  $654 \text{ mA}\cdot\text{L}^{-1}$  (o **densidad de corriente proyectada**<sup>6</sup> de  $1,09 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) y una tasa de producción de hidrógeno normalizada de  $7,10 \text{ LL}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  aplicando un voltaje externo de 1 V (Guo et al. 2017).

---

<sup>4</sup>( $\text{LL}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ): tasa de producción de hidrógeno normalizada por el volumen total del reactor (1 L) (Guo et al. 2017).

<sup>5</sup>**Densidad de corriente volumétrica**: "corriente normalizada por el volumen total del reactor" ( $\text{mA}\cdot\text{L}^{-1}$ ) (Guo et al. 2017).

<sup>6</sup>**Densidad de corriente proyectada**: "corriente normalizada por la superficie proyectada del ánodo original" ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (Guo et al. 2017).

Sin embargo, este dispositivo todavía no ha alcanzado la sostenibilidad, pues la producción no es suficiente para compensar los todavía altos costes de capital y la estabilidad aún es baja. Las vías de investigación futuras radicarán en intentar incrementar el conocimiento de los microorganismos que limitan la actuación a gran escala (Lu and Ren 2016), el estudio de la eficacia de métodos de enriquecimiento y aclimatación previos de los microorganismos, así como selección de bacterias con alta actividad electroquímica (Kumar et al. 2017). Además, es necesario mantener la estabilidad a largo plazo, realizar más investigaciones sobre los materiales a emplear y, lograr, por tanto, una mayor eficiencia con costes monetarios menores sin poner en peligro el rendimiento energético (Guo et al. 2017). Es una tecnología atractiva para la protección medioambiental, lo que sugiere que puede contribuir a la sostenibilidad (Kumar et al. 2017), pero para ello son necesarios estos avances.

### 5.3. Célula de combustible microbiano sedimentaria o *sediment microbial fuel cell* (SMFC)

Pese a que desde 1990 el estudio de las *MFCs* y *SMFCs* se incrementó, no fue hasta 2005 cuando se creó la primera *SMFC* funcional, estable durante 18 meses de experimentación (Lowy et al. 2006), fruto de la investigación llevada a cabo en años anteriores por Tender y Reimers sobre los materiales óptimos para los electrodos e influencia de la composición del sedimento y temperatura (Reimers et al. 2001). Estos dispositivos proporcionan diversas aplicaciones. Se pueden emplear como fuente de alimentación de energía de dispositivos inalámbricos, con el fin de llevar a cabo estudios oceanográficos (e.g. patrones de migración de animales acuáticos, monitorización de parámetros como la humedad, salinidad, temperatura y niveles de oxígeno), vigilancia militar y monitoreo ambiental (Abbas et al. 2017). Además, se ha comprobado su eficacia en la eliminación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), con intervención de *Geobacter* en la superficie del electrodo del ánodo (Yu et al. 2017). También se pueden emplear para la remediación de contaminantes, como por ejemplo los metales pesados (e.g. uranio y cadmio), de modo que reducen las formas tóxicas y solubles (Abbas et al. 2017). Así mismo, las *SMFCs* poseen una durabilidad y fiabilidad en el funcionamiento a largo plazo, al contrario que las baterías tradicionales (Mitov et al. 2015).

Si bien, precisamente entre las limitaciones, está la necesidad de una mayor generación de electricidad a largo plazo (Zabihallahpoor et al. 2015) y la destrucción de los dispositivos en el medio natural debido a la actuación de peces o a la corrosión abiótica de los materiales de electrodos y conexiones (Abbas et al. 2017). Por tanto, la principal dificultad a la hora de su implantación a gran escala es el bajo potencial de salida, que se limita a un rango de 0,3-0,6 V (Donovan et al. 2011). Sin embargo, a pesar de ello, pueden utilizarse como fuentes de alimentación para sensores ambientales. Se ha comprobado que con una producción de 4 mW una *SMFC* puede alimentar a un sensor inalámbrico que necesita 11 mW, mediante el empleo de un sistema de administración de energía o *power management system* (*PMS*) (Donovan et al. 2011), que presenta un condensador, para almacenar la energía generada y un sistema de repotenciación para aumentar el potencial cuando la potencia del sistema no es suficiente para alimentar el sensor y así evitar la necesidad de una batería tradicional (Tommasi and Lombardelli 2017).

Pese a que la máxima densidad de potencia actual reportada en las referencias de esta revisión es de 4,09 mW·m<sup>-2</sup> (Ye et al. 2016), la *SMFC* parece alcanzar la producción energética sostenible en menor espacio de tiempo, pues con esta generación de electricidad, tras 2,7 años la energía invertida se recupera y a partir de ese momento, la electricidad generada solo proporciona ganancias. Si se prosigue con la investigación para

conseguir la mejora en el diseño biológico y en los materiales empleados para incrementar la potencia generada, se podría alcanzar un valor de densidad de potencia de  $17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , que haría que el tiempo necesario para que fuese sostenible disminuyese de 2,7 años a 2 días (Tommasi and Lombardelli 2017). Por tanto, este dispositivo, es el más prometedor a corto plazo, lo que se debe a que son necesarios pocos materiales de construcción, pues los electrodos se introducen en los ambientes naturales ricos en materia orgánica, a que su estructura es ligera, y a la ausencia de un sistema de bombeo y mezcla para el aporte de sustrato, de modo que la inversión energética necesaria para construirlo es menor (Tommasi and Lombardelli 2017) que la de las otras configuraciones mencionadas en la revisión.

#### 5.4. Célula de combustible microbiano fotosintética o *photosynthetic microbial fuel cell* (PMFC)

Las PMFCs son las más recientes, pues su origen data de 2008 cuando Strik et al. elaboraron un sistema de producción de electricidad a través del empleo de microalgas y/o rizodepósitos de los alrededores de las plantas (Strik et al. 2008). Debido a que la producción de bioenergía puede ser exclusivamente a través de los rizodepósitos evitando la utilización de la biomasa (Helder et al. 2010), las PMFCs favorecen diferentes aplicaciones. Pueden establecerse en terrenos destinados a la agricultura, al no competir con cultivos convencionales por el espacio, y en áreas como humedales o tejados (Sophia and Sreeja 2017). Precisamente, respecto a la utilización en humedales, hay estudios acerca de especies como *Spartina anglica*, propia de las marismas, que muestran evidencias de que pueden sobrevivir y producir electricidad en un dispositivo PMFC (Helder et al. 2010). También podrían emplearse para el tratamiento de aguas residuales, o reducción eficiente de sustancias como amonio o nitrato, cuando se trabaja conjuntamente a un dispositivo SMFC, así como puede implantarse en techos, siendo una herramienta de lucha contra el cambio climático y aumentando el valor estético del paisaje (Nitisravut and Regmi 2017) aunque en este caso, se tendrían que reducir los costes e incrementar la producción eléctrica para que resultase eficiente y sostenible (Strik et al. 2011).

Sin embargo, aún se necesitan mayores avances para alcanzar la sostenibilidad energética. Algunas de las limitaciones de estos dispositivos son la presencia excesiva de oxígeno, que participa en la reducción a agua antes de que los electrones alcancen el ánodo (Zou et al. 2009), el poco conocimiento de las interacciones planta-microorganismo, lo cual afecta al rendimiento, al haber lagunas en el conocimiento del mecanismo de transferencia de electrones al ánodo y, por último, el ensuciamiento, deterioro del material y conservación del vegetal (Nitisravut and Regmi 2017). Además, aunque su implementación en los campos de arroz no alteraría el cultivo, en esta zona se generan elevadas emisiones de metano, que contribuye a los gases de efecto invernadero, y la densidad de potencia máxima obtenida, utilizando plantas de humedales, como *Spartina anglica* fue tan solo de  $222 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  (Nitisravut and Regmi 2017). Otros registros indican que en los primeros estudios sobre las PMFCs se estimó que la generación de electricidad sería de  $67 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  en países del occidente de Europa, mientras que el Consorcio Europeo de Investigación ([www.plantpower.eu](http://www.plantpower.eu)) está trabajando e investigando para conseguir una producción óptima de  $3.200 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  (Strik et al. 2011).

Aunque es una tecnología conceptualmente sostenible, pues al igual que en las SMFCs se podría implementar directamente en el ambiente disminuyendo los costes de construcción, no se puede predecir la relación entre su coste de instalación y la efectividad resultante (Strik et al. 2011) al presentar una pequeña producción eléctrica y limitaciones condicionadas por la fisiología de las plantas y la cantidad de energía solar incidente. Por



tanto, es necesaria más investigación para que la sostenibilidad de este producto sea real en un futuro más cercano. Han de estudiarse las relaciones de los microorganismos con la rizosfera de las plantas, pues de ese modo se mejorará el conocimiento de transferencia de electrones (Nitorisavut and Regmi 2017), y se podrá comprender mejor el funcionamiento obteniendo mayores potencias de salida (Strik et al. 2011).

## 6. Parámetros condicionantes del rendimiento en dispositivos SMFCs, vías de investigación, escalado y futuras aplicaciones

### 6.1. Parámetros condicionantes de los dispositivos SMFCs y vías de investigación

El análisis de la **comunidad microbiana** es necesario para comprender el funcionamiento de la SMFC y mejorar su rendimiento. Para ello, el procedimiento general es la toma de una muestra del biofilm presente en el ánodo, tras lo cual se extrae el DNA y posteriormente se amplifica la región de interés que, por lo general, se encuentra en el gen del 16S rRNA (Zhao et al. 2016). Este procedimiento también se realiza en arqueas, ya que los miembros de *Methanosaetaceae* y metanogénicos mixotróficos *Methanosarcinaceae* pueden disminuir la eficacia del dispositivo, al competir la metanogénesis con la exoelectrogénesis por la utilización de sustrato y reducir la estabilidad del sistema por la producción de biogás (Zhao et al. 2016). Diferentes grupos de microorganismos han mostrado capacidad de generación de electricidad, tales como los pertenecientes a los filos *Firmicutes*, *Acidobacteria*, *Proteobacteria* [concretamente las Deltaproteobacterias y Gammaproteobacterias (Hsu et al. 2017)] así como hongos y microalgas (Abbas et al. 2017). El género con más presencia en los estudios es *Geobacter*, cuyos biofilms pueden funcionar como supercondensadores debido a sus polímeros conductores, pero también existen otras especies bacterianas como las pertenecientes a *Shewanella* (e.g. *Shewanella oneidensis*) e incluso bacterias patógenas como *Klebsiella pneumonia* (Abbas et al. 2017).

Aunque uno de los valores de densidad de corriente más altos obtenidos se corresponde con *Thermincola ferriacetica* ( $1,2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) éste se obtuvo con el empleo de un mediador químico (antraquinona-2,6-disulfonato) que podría causar problemas de toxicidad e inestabilidad. Consecuentemente, en futuras investigaciones, podría resultar interesante la utilización de *Shewanella oneidensis* DsP10, pues alcanzó la densidad de corriente más elevada ( $0,5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) con mediadores naturales, tales como la riboflavina y flavina (Abbas et al. 2017). Sin embargo, son necesarios más datos para conocer la influencia de la composición de la comunidad microbiana en el rendimiento final (Hsu et al. 2017). De modo que el campo de la electromicrobiología tendrá que ser más explorado en los próximos años, presentándose la Ingeniería Genética y el estudio de las vías genéticas y metabólicas de especies pertenecientes a *Geobacter* y *Shewanella* (Abbas et al. 2017) como líneas de investigación fundamentales en este proceso.

El **pH** y **temperatura** son también determinantes, tanto para la generación de electricidad como para la capacidad de remediación de metales pesados u otros contaminantes (Abbas et al. 2017). Con cada variación de pH, pueden producirse alteraciones fisiológicas, pues cada microorganismo tiene unas condiciones óptimas en las cuales puede realizar la máxima actividad. Los microorganismos suelen tener vías metabólicas acidófilas, siendo la transferencia de electrones más eficiente en condiciones ácidas, sin embargo, el pH del dispositivo se ajusta normalmente por la acción de los microorganismos, pues la generación y consumo de protones a través del circuito es simultánea (Abbas et al. 2017). La temperatura afecta a la conductividad del sedimento, a la cinética de las reacciones metabólicas y a la distribución y composición de las

comunidades microbianas anódicas y catódicas, puesto que cada especie microbiana presenta también un valor óptimo de temperatura (Abbas et al. 2017). En fase experimental se ha observado que a 20°C un dispositivo *SMFC* puede producir una magnitud de corriente de 10 a 100 veces menor que una *SMFC* a 30°C (Velasquez-Orta et al. 2017). De hecho, otros experimentos realizados lo corroboran, pues muestran que un biofilm tiene una actividad exoelectrogénica máxima en un rango de temperaturas de 30-45°C (Abbas et al. 2017). No obstante, en experimentos realizados por Ye et al. se obtuvo una densidad de potencia de 4,09 mW·m<sup>-2</sup> a 4°C y de 3,33 mW·m<sup>-2</sup> a 35°C lo que podría deberse a que los microorganismos electrogénicos tolerantes a las bajas temperaturas pueden llegar a alcanzar tasas respiratorias equivalentes o mayores a las bacterias mesófilas con el tiempo (Ye et al. 2016). Por ello los rangos de temperatura y pH adecuados tendrán que determinarse para cada situación experimental concreta. Por ejemplo, si se seleccionase sedimentos con presencia de *Shewanella oneidensis* DSP10, la temperatura óptima sería 37°C (Abbas et al. 2017) así como un pH comprendido entre 6-8, habiéndose registrado actividad eficiente a 6,5 (Abbas et al. 2017) y a 7,4 (Ringelisen et al. 2006).

El **ambiente** y **sustrato** donde se implante la *SMFC* son otros parámetros a tener en cuenta. La potencia de los dispositivos se puede incrementar con la adición de sustratos como glucosa o acetato, o bien con la instalación de plantas que produzcan carbohidratos producto de la fotosíntesis, de modo que los microorganismos puedan descomponerlos y generar electrones, mejorando la transferencia al ánodo del dispositivo *SMFC* (Zabihallahpoor et al. 2015). Las características físico-químicas del agua también condicionan el potencial final, pues el pH, la temperatura, los sólidos disueltos y en suspensión, la dinámica de flujo y el oxígeno disuelto son factores muy importantes en la generación de electricidad (Abbas et al. 2017). Aunque ahora el estudio de *SMFCs* en agua dulce ha aumentado, los dispositivos más estudiados son los localizados en agua de mar debido a una mayor conductividad (Song and Jiang 2011). De todos modos, la localización dependerá del tipo de experimento a realizar y los intereses derivados [e.g. especies de *Desulfuromonas* se encuentran en ánodos de *SMFCs* marinas y las de *Geobacter* predominan en *SMFCs* de agua dulce (Hamdan et al. 2017)]. Para mejorar el rendimiento se están ideando prototipos con cátodos flotantes, complementados con microalgas [por ejemplo *Chlorella vulgaris* (Zabihallahpoor et al. 2015)] y cátodos giratorios para aumentar el oxígeno en dicho electrodo del dispositivo (Abbas et al. 2017). Si bien, si se desarrollasen dispositivos *SMFCs* para estudio de las profundidades de océanos como el Atlántico, el océano profundo está oxigenado, puesto que aguas frías y ricas en oxígeno superficiales procedentes de latitudes elevadas se hunden debido a su densidad relativamente alta (Levinton 2011).

Por último, la **configuración del dispositivo** determinará, no solo los costes del desarrollo, sino la eficiencia obtenida y en resumen su potencial sostenibilidad. Por ejemplo, la resistencia interna de las *SMFCs*, que condiciona una menor densidad de corriente, depende de la distancia de los electrodos y de su profundidad, de modo que, para un buen rendimiento, los electrodos deben estar lo más próximos que sea posible para facilitar el flujo de electrones y protones (Abbas et al. 2017). A mayor profundidad de ánodo, pueden incrementarse las resistencias por una mayor separación entre electrodos, pero también puede darse que las densidades obtenidas sean mayores pues hay microorganismos activos que se encuentran a amplias profundidades en el sedimento (Zabihallahpoor et al. 2015). Este es el caso de *Shewanella oneidensis*, cuyo hábitat son las aguas profundas anaeróbicas, aunque también se pueden localizar en el suelo, en ambientes sedentarios (MicrobeWiki 2017). Además, los materiales de electrodos condicionan la transferencia de electrones y el establecimiento de microorganismos, por lo que deben resistir a la corrosión y biodegradación para una actuación del dispositivo duradera en el tiempo que derive en



rentabilidad (Abbas et al. 2017). Algunos estudios han mostrado la ventaja del empleo de fieltro de carbono en el ánodo y platino en el cátodo (Kagan et al. 2014), así como carbono en forma de nanotubos para incrementar la superficie anódica (Abbas et al. 2017). El material que conecta ambos electrodos debe presentar una resistencia interna reducida y resistir a la corrosión, y, aunque se está investigando el empleo de alambre de cobre cubierto de oro por obtenerse mayor rendimiento y reducción de costes, debido a que se ve igualmente afectado por la corrosión, en los experimentos se continúa empleando titanio (Kagan et al. 2014). Sin embargo, en términos de sostenibilidad, es más recomendable emplear cobre que titanio por presentar menores requerimientos energéticos (Tommasi and Lombardelli 2017), siendo necesaria más investigación en el desarrollo de materiales frente a la corrosión.

## 6.2. Idealización de un caso con aplicaciones científicas

Tradicionalmente, para la carga de sensores de parámetros físicos, químicos y/o biológicos, se utilizan baterías desechables, cuya necesidad de ser reemplazadas incrementa los costes, además del impacto medioambiental ocasionado en el caso de utilización de baterías con componentes tóxicos (Ewing et al. 2014). Puesto que no es una metodología sostenible, es necesaria la búsqueda de alternativas para la carga de estos dispositivos, como las *SMFCs*. Con el fin de ilustrar las ventajas que podría proporcionar su implantación, se presenta una idealización de un caso de interés biológico y social.

En las regiones costeras del Atlántico, entre los 40°N y 60°N, las tasas de crecimiento de dinoflagelados, como *Alexandrium fundyense* y *Dinophysis acuminata*, están aumentando y su etapa de afloramiento perdura más en el tiempo, lo que se cree que es debido al incremento de temperaturas (Gobler et al. 2017). Esta es una situación problemática en el Golfo de Maine, donde *Alexandrium fundyense* genera episodios de mareas rojas, produciendo la saxitoxina, una toxina neuromuscular que supone un riesgo para la salud humana y la economía pesquera, al acumularse en crustáceos y peces potencialmente consumidos (MicrobeWiki 2017). Puesto que habitan en la zona fótica de la columna de agua de las zonas costeras, y que además de por las elevadas concentraciones de nutrientes (MicrobeWiki 2017), parecen verse condicionadas por elevadas temperaturas, la instalación de *SMFCs*, adquiere potencial interés para la alimentación sostenible de un sensor de nutrientes disueltos y de temperaturas.

Sin embargo, antes de su implementación en el medio natural, deben realizarse pruebas experimentales a nivel de laboratorio. Para ello, es necesaria la toma de una muestra de sedimento en la zona en la que se implantaría el dispositivo. En primer lugar, se realizaría un análisis microbiológico de una submuestra de sedimento, comprobando la eficiencia eléctrica de los microorganismos identificables. Posteriormente, se construiría un dispositivo *SMFC*, para lo cual, tras la revisión realizada de los materiales empleados, el ánodo estaría conformado por fieltro de carbono o carbono en forma de nanotubos y el cátodo de platino, ambos unidos por un cable de cobre. Con esta configuración y la utilización de una submuestra del sedimento recolectado, se iniciaría el dispositivo reproduciendo las condiciones existentes en el medio en el que se desea implantar, para analizar los resultados e idear mejoras en la configuración si fuesen necesarias. Por último, antes del procedimiento de escalado para implementación en la realidad, se realizaría una experimentación *in situ*. Los resultados de producción eléctrica en experimentos similares se encuentran entre 0,3 y 0,5 V y milivatios de potencia, pero no es suficiente para alimentar a un sensor inalámbrico, cuyo consumo es de más de 1 V y cientos de milivatios para transmitir datos (Tang et al. 2015). Con el objeto de incrementar la eficiencia, este proceso de escalado debe consistir en múltiples *SMFCs* que funcionen independientemente y así,

poder utilizar un sistema *PMS* autosostenible, es decir, que no precise una carga de fuentes externas para funcionar (Tang et al. 2015).

En consecuencia, para estar eléctricamente aisladas, y evitar que, si un electrodo se vea afectado, interfiera en los demás disminuyendo la potencia, el *PMS* debe integrar un sistema eléctrico basado en la naturaleza de la energía producida por la *SMFC*, es decir poca potencia y acumulada a lo largo del tiempo con entregas intermitentes a la batería. Por tanto, la batería del *PMS* no precisa estar conectada a los diferentes dispositivos *SMFC* de modo permanente, sino que se puede programar para que comience el proceso de carga cuando se transfiera un valor umbral, y así aumentar la eficacia energética del sistema y aislar los electrodos de las distintas *SMFCs* utilizadas (Tang et al. 2015). El *PMS*, como se mencionó en anteriores apartados, tiene la capacidad de amplificar el voltaje, de modo que hubo análisis experimentales donde se ha registrado que puede convertir un voltaje de 0,4V a 2,7 V, alimentando el sensor que puede retransmitir los datos, de modo inalámbrico (Tang et al. 2015). Puesto que en los paseos marítimos es cada vez más frecuente el alumbramiento de farolas mediante el empleo de placas solares, podría aprovecharse e implementarse en dicha farola un miniordenador denominado *Raspberry Pi3*, por su bajo coste, peso y eficacia (Soltmann and Hall 2017). Su consumo energético es bajo, por lo que podría ser alimentado por cualquier fuente de alimentación que proporcione 5 V y 1,2 A (Kuziek et al. 2017). Si se implementa en una farola alimentada con energía solar, se podría acoplar de modo eficiente y barato una batería al miniordenador, cargada por la energía procedente de la farola, de modo que, añadida a la batería que ya existiría asociada a la farola, habría otra para asegurar su funcionamiento continuo. Si se implementa en una farola sin placas solares, tampoco supondría un problema para el alumbrado, por su bajo consumo. El empleo de *Raspberry Pi3*, proporciona múltiples posibilidades, como el almacenaje de los datos recibidos y su procesamiento, de modo que pueden transmitir en tiempo real los datos representados gráfica o numéricamente, a un ordenador o incluso podrían observarse mediante una aplicación de móvil, siendo, por tanto, un sistema que permite experimentos no restringidos al laboratorio (Kuziek et al. 2017) (**Anexo III. Componentes *SMFCs* y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas**). Esto presenta mucha importancia en este caso, donde cualquier detección de subida anormal de nutrientes y/o temperaturas podría permitir una detección precoz de las toxinas y poder tomar las medidas preventivas o resolutivas necesarias. Otra alternativa que está en estudio para este tipo de circunstancias es la utilización de una *MFC* que actúe como biosensor para la detección de sustancias tóxicas en el agua, puesto que los componentes tóxicos inhiben la actividad metabólica bacteriana mostrándose en una salida de corriente diferente (Yang et al. 2016). Este mecanismo permite una respuesta rápida a los cambios y una monitorización a largo plazo de la calidad del agua, debido a su autoreparación y autosostenibilidad, sin embargo, aún no se ha podido aplicar en el mundo real porque pueden responder a todo tipo de estimulantes generando falsos positivos (Yang et al. 2016). Por ello, es preciso realizar más investigaciones, para lograr una mayor especificidad.

Por último, puesto que, aunque el mar es el hábitat más extenso del planeta, es el medio más desconocido (Zheng et al. 2017), podrían llevarse a cabo investigaciones para desarrollar *SMFCs* que puedan operar eficientemente en esas condiciones, alimentando sensores en aguas profundas. La información proporcionada por estos sensores podría ser recopilada con un vehículo autónomo submarino, o *autonomous underwater vehicle (AUV)*, sin embargo, el rendimiento práctico de este sistema es viable en teoría, pero hay que evaluar la relación coste-eficacia en la realidad (Zheng et al. 2017).

## 7. Conclusiones/Conclusións/Conclusions

### 7.1. Conclusiones

- Las *MFCs* están en constante desarrollo, especialmente en Estados Unidos, China (y otros países del este asiático) y países europeos como Holanda. El auge en la investigación se muestra en la fecha de las producciones científicas, pues 2016 ostenta el mayor porcentaje de publicaciones.
- Las máximas potencias obtenidas con las diferentes configuraciones son del orden de milivatios, pero no son comparables por la variabilidad de las condiciones experimentales en las que se han registrado. Por tanto, en base a su sostenibilidad, la *SMFC* es la más prometedora a corto plazo, pues tras 2,7 años se recuperaría la energía invertida, obteniéndose ganancias.
- Los principales parámetros condicionantes de la efectividad de la *SMFC* son la comunidad microbiana, el material de los electrodos, la configuración del sistema, y parámetros físico-químicos. Por lo general una cantidad de oxígeno suficiente y la menor distancia entre los electrodos derivan en mayores rendimientos, mientras que la temperatura y pH óptimos varían en función de los microorganismos presentes en el medio.
- Se propone la utilización de múltiples *SMFCs* para alimentar un *PMS* autosostenible que proporcione energía a un sensor de nutrientes disueltos y de temperaturas, en el Golfo de Maine, para facilitar el control de *Alexandrium fundyense*. Además, se plantea la eficiencia resultante de complementación con otras energías renovables, como la solar, y con las nuevas tecnologías, como el miniordenador *Raspberry Pi* para el procesamiento de los datos del sensor. Sin embargo, para un mayor desarrollo de futuras aplicaciones de potencial interés para la ciencia y sociedad, es necesaria más investigación para la mejora de los dispositivos.

### 7.2. Conclusións

- As *MFCs* están en constante desenvolvemento, especialmente nos Estados Unidos, China (e outros países do este asiático) e países europeos como Holanda. O auge na investigación móstrase na data das producións científicas, pois 2016 ostenta a maior porcentaxe de publicacións.
- As máximas potencias obtidas coas diferentes configuracións son do orden de milivatios pero non comparables pola variabilidade das condicións experimentais nas que se rexistraron. Polo tanto, en base a súa sustentabilidade, a *SMFC* é a máis prometedora a curto prazo, pois tras 2,7 anos recuperaríase a enerxía invertida, obténdose ganancias.
- Os principais parámetros condicionantes da efectividade da *SMFC* son, a comunidade microbiana, o material dos electrodos, a configuración do sistema, e parámetros físico-químicos. Polo xeral, unha cantidade de oxíxeno suficiente e a menor distancia entre os electrodos derivan en maiores rendementos, mentres que a temperatura e pH óptimos varían en función dos microorganismos presentes no medio.

- Propónse o emprego de múltiples *SMFCs* para alimentar un *PMS* autosostible, que proporcione enerxía a un sensor de nutrientes disoltos e de temperaturas no Golfo de Maine, para facilitar o control de *Alexandrium fundyense*. Ademáis, plantéxase a eficiencia resultante de complementación con outras enerxías renovables, como a solar, e coas novas tecnoloxías, como o miniordenador *Raspberry Pi* para o procesamento dos datos do sensor. Sen embargo, para un maior desenvolvemento de futuras aplicacións de potencial interese para a ciencia e sociedade, é necesaria máis investigación para a mellora dos dispositivos.

### 7.3. Conclusions

- *MFCs* are in constant development, especially in the United States, China (and other East Asian countries), and European countries such as the Netherlands. The boom in research is shown at the date of scientific productions, since 2016 holds the highest percentage of publications.
- The maximum powers obtained with the different configurations are of the order of milliwatts, but they can not be compared due to their variable experimental conditions in which they have been recorded. Therefore, based on its sustainability, *SMFC* is the most promising in the short time, as after 2,7 years the energy invested would be recovered, making profits.
- The main parameters that determine the effectiveness of the *SMFC* are the microbial community, the electrode material, the system configuration and the physiochemical conditions. Generally, a sufficient oxygen and the shortest distance between the electrodes trigger in higher yields, while the optimum temperature and pH vary depending on the microorganisms present in the medium.
- It proposes the use of multiple *SMFCs* to feed a self-sustaining *PMS* that provides energy to a dissolved nutrients and temperatures sensor in the Gulf of Maine, in order to facilitate the control of *Alexandrium fundyense*. In addition, the efficiency resulting from complementation with other renewable energies, such as solar, and with new technologies, such as the mini-computer *Raspberry Pi* for the processing of sensor data, is proposed. However, for further development of future applications of potential interest to science and society, more research is needed in order to improve the devices.

## 8. Agradecimientos

La realización del TFG supone un esfuerzo cooperativo, por ello, no puedo dejar de agradecer la ayuda recibida. A todos los profesores que han contribuido a mi desarrollo como científica y, especialmente, a Montserrat Domínguez y Óscar Cabeza por apoyar y mejorar mis ideas con paciencia y consejos. A Isaac Darriba por su ayuda con las referencias bibliográficas. Al departamento de Estadísticas Energéticas de las Naciones Unidas, y concretamente a Leonardo Rocha Souza, por los datos proporcionados vía correo. A todos mis compañeros y especialmente a Patricia, Inés, Marta e Ismael por recorrer este camino conmigo. Por último, a mis padres y hermano, por su constante apoyo, consejos, comprensión, implicación y paciencia. Esta carrera es más vuestra que mía.

## 9. Bibliografía

Abbas SZ, Rafatullah M, Ismail N, Syakir MI. 2017. A review on sediment microbial fuel cells as a new source of sustainable energy and heavy metal remediation: mechanisms and future prospective. *International Journal of Energy Research*. 41(9):1242-1264.

Agnès C, Holzinger M, Le Goff A, Reuillard B, Elouarzaki K, Tingry S, Cosnier S. 2014. Supercapacitor/biofuel cell hybrids based on wired enzymes on carbon nanotube matrices: autonomous reloading after high power pulses in neutral buffered glucose solutions. *Energy and Environmental Science*. 7(6):1884-1888.

Arends JBA, Verstraete W. 2012. 100 years of microbial electricity production: three concepts for the future. *Microbial Biotechnology*. 5(3):333-346.

AutoCAD 2018 [DVD-ROM]. 2017. California (US): Autodesk Inc. 1 DVD-ROM. También disponible en <https://www.autodesk.es/products/autocad/overview>.

Corbella C, Puigagut J, Garfí M. 2017. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. *Science of the Total Environment*. 584:355-362.

[CSE] Council of Science Editors. 2014. *Scientific style and format: the CSE manual for authors, editors, and publishers*. 8th ed. Chicago (IL): The University of Chicago Press.

Davis F, Higson SPJ. 2007. Biofuel cells: recent advances and applications. *Biosensors and Bioelectronics*. 22(7):1224-1235.

de Alegría IM, Basañez A, de Basurto PD, Fernández-Sainz A. 2016. Spain's fulfillment of its Kyoto commitments and its fundamental greenhouse gas (GHG) emission reduction drivers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 59:858-867.

de Dios MAF, Iglesias O, Bocos E, Pazos M, Sanromán MA. 2014. Application of benthonic microbial fuel cells and electro-Fenton process to dye decolourisation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20(5):3754-3760.

Dincer F. 2011. The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(9):5135-5142.

Domínguez-Garay A, Boltjes K, Esteve-Núñez A. 2016. Cleaning-up atrazine-polluted soil by using microbial electroremediating cells. *Chemosphere*. 161:365-371.

Donovan C, Dewan A, Peng HA, Heo D, Beyenal H. 2011. Power management system for a 2.5 W remote sensor powered by a sediment microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*. 196(3):1171-1177.

du Toit H, Di Lorenzo M. 2015. Continuous power generation from glucose with two different miniature flow-through enzymatic biofuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*. 69:199-205.

Ewing T, Ha PT, Babauta JT, Tang NT, Heo D, Beyenal H. 2014. Scale-up of sediment microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*. 272:311-319.

Ewing T, Ha PT, Beyenal H. 2017. Evaluation of long-term performance of sediment microbial fuel cells and the role of natural resources. *Applied Energy*. 192:490-497.

- Frank S, Poncharal P, Wang ZL, de Heer WA. 1998. Carbon nanotube quantum resistors. *Science*. 280(5370):1744-1746.
- Galindo-de-la-Rosa J, Arjona N, Moreno-Zuria A, Ortiz-Ortega E, Guerra-Balcázar M, Ledesma-García J, Arriaga LG. 2017. Evaluation of single and stack membraneless enzymatic fuel cells based on ethanol in simulated body fluids. *Biosensors and Bioelectronics*. 92:117-124.
- Galvani L. 1791. *De viribus electricitatis in motu musculari: commentarius*. Bononiae (It): Ex Typographia Inlilituti Scientiarum.
- Gobler CJ, Doherty OM, Hattenrath-Lehmann TK, Griffith AW, Kang Y, Litaker RW. 2017. Ocean warming since 1982 has expanded the niche of toxic algal blooms in the North Atlantic and North Pacific oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America*. 114(19):4975-4980.
- Guo K, PrévotEAU A, Rabaey K. 2017. A novel tubular microbial electrolysis cell for high rate hydrogen production. *Journal of Power Sources*. 356:484-490.
- Hamdan HZ, Salam DA, Hari AR, Semerjian L, Saikaly P. 2017. Assessment of the performance of SMFCs in the bioremediation of PAHs in contaminated marine sediments under different redox conditions and analysis of the associated microbial communities. *Science of the Total Environment*. 575:1453-1461.
- Helder M, Strik DPBTB, Hamelers HVM, Kuhn AJ, Blok C, Buisman CJN. 2010. Concurrent bio-electricity and biomass production in three plant microbial fuel cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*. 101(10):3541-3547.
- Helder M. 2012. Design criteria for the plant-microbial fuel cell: electricity generation with living plants-from lab to application [tesis doctoral]. [Wageningen (NL)]: University of Wageningen.
- Hindatu Y, Annuar MSM, Gumel AM. 2017. Mini-review: anode modification for improved performance of microbial fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 73:236-248.
- Hsu L, Mohamed A, Ha PT, Bloom J, Ewing T, Arias-Thode M, Chadwick B, Beyenal H. 2017. The influence of energy harvesting strategies on performance and microbial community for sediment microbial fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*. 164(3):H3109-H3114.
- Kagan JA, Hsu L, Higier A, Arias-Thode YM, Chadwick DB, Beyenal H. 2014. Design and performance considerations for benthic microbial fuel cells. En: 2014 Oceans- St. John's; 2014 Sep 14-19; St. John's, Canada. New York (NY): IEEE. p. 1-5.
- Krieg T, Enzmann F, Sell D, Schrader J, Holtmann D. 2017. Simulation of the current generation of a microbial fuel cell in a laboratory wastewater treatment plant. *Applied Energy*. 195:942-949.



- Kumar G, Bakonyi P, Zhen GY, Sivagurunathan P, Koók L, Kim SH, Tóth G, Nemestóthy N, Bélafi-Bakó K. 2017. Microbial electrochemical systems for sustainable biohydrogen production: surveying the experiences from a start-up viewpoint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70:589-597.
- Kuziek JWP, Shienh A, Mathewson KE. 2017. Transitioning EEG experiments away from the laboratory using a Raspberry Pi 2. *Journal of Neuroscience Methods*. 277:75-82.
- Levinton JS. 2011. *Marine biology: function, biodiversity, ecology*. 3rd ed. New York (NY): Oxford University Press.
- Liu H, Grot S, Logan BE. 2005. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environmental Science and Technology*. 39(11):4317-4320.
- Logan BE, Regan JM. 2006. Microbial fuel cells: challenges and applications. *Environmental Science and Technology*. 40(17):5172-5180.
- Lowy DA, Tender LM, Zeikus JG, Park DH, Lovley DR. 2006. Harvesting energy from the marine sediment-water interface II: kinetic activity of anode materials. *Biosensors and Bioelectronics*. 21(11):2058-2063.
- Lu L, Ren ZYJ. 2016. Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: a state of the art review. *Bioresource Technology*. 215:254-264.
- Mercuri EGF, Kumata AYJ, Amaral EB, Vitule JRS. 2016. Energy by microbial fuel cells: scientometric global synthesis and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 65:832-840.
- MicrobeWiki. 2006-2016. Gambier (US): Kenyon College; [consultado 6 julio 2017]. <https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/MicrobeWiki>.
- Mitov M, Bardarov I, Mandjukov P, Hubenova Y. 2015. Chemometrical assessment of the electrical parameters obtained by long-term operating freshwater sediment microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*. 106:105-114.
- Moqsud MA, Yoshitake J, Bushra QS, Hyodo M, Omine K, Strik D. 2015. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*. 36:63-69.
- Nitorisavut R, Regmi R. 2017. Plant microbial fuel cells: a promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76:81-89.
- Paitier A, Godain A, Lyon D, Haddour N, Vogel TM, Monier JM. 2017. Microbial fuel cell anodic microbial population dynamics during MFC start-up. *Biosensors and Bioelectronics*. 92:357-363.
- Potter MC. 1911. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*. 84(571):260-276.
- Prasad KP, Chen Y, Chen P. 2014. Three-dimensional graphene-carbon nanotube hybrid for high-performance enzymatic biofuel cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 6(5):3387-3393.

- Rasmussen M, Abdellaoui S, Minteer SD. 2016. Enzymatic biofuel cells: 30 years of critical advancements. *Biosensors and Bioelectronics*.76:91-102.
- Real Decreto 359/2017, de 31 de marzo, por el que se establece una convocatoria para el otorgamiento del régimen retributivo específico a nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables en el sistema eléctrico peninsular. 2017. Boletín Oficial del Estado. 78:25504-25506.
- Reimers CE, Tender LM, Fertig S, Wang W. 2001. Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *Environmental Science and Technology*. 35(1):192-195.
- Ren H, Torres CI, Zhang Z, Chae J. 2017. A biologically-inspired electro-chemical reference electrode. En: 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS); 2017 Jan 22-26; Las Vegas. New York (NY): IEEE. p. 354-357.
- Resolución de 10 de abril de 2017, de la Secretaría de Estado de Energía por la que se convoca subasta para la asignación del régimen retributivo específico a nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, al amparo de lo dispuesto en la Orden ETU/315/2017, de 6 de abril. 2017. Boletín Oficial del Estado. 87:29592-29595.
- Ringeisen BR, Henderson E, Wu PK, Pietron J, Ray R, Little B, Biffinger JC, Jones-Meehan JM. 2006. High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environmental Science and Technology*. 40(8):2629-2634.
- Rittmann BE. 2008. Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering*. 100(2):203-212.
- Rivera I, Bakonyi P, Cuautle-Marín MA, Buitrón G. 2017. Evaluation of various cheese whey treatment scenarios in single-chamber microbial electrolysis cells for improved biohydrogen production. *Chemosphere*. 174:253-259.
- Robinson J, Francis G, Legge R, Lerner S. 1990. Defining a sustainable society: values, principles and definitions. *Alternatives: Perspectives on Society Technology and Environment*. 17(2):36-46.
- Saba B, Christy AD, Yu ZT, Co AC. 2017. Sustainable power generation from bacterio-algal microbial fuel cells (MFCs): an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 73:75-84.
- Santoro C, Arbizzani C, Erable B, Ieropoulos I. 2017. Microbial fuel cells: from fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*. 356:225-244.
- Scopus. 1996- . Ámsterdam (NL): Elsevier. [consultado 6 julio 2017]. <https://www.scopus.com/>.
- Soltmann LM, Hall CE. 2017. Power required flight testing of unmanned aerial systems using non-steady-state flight. *Journal of Aircraft*. 54(3):1162-1171.
- Song TS, Jiang HL. 2011. Effects of sediment pretreatment on the performance of sediment microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 102(22):10465-10470.

- Song Y, Penmatsa V, Wang CL. 2014. Modeling and simulation of enzymatic biofuel cells with three-dimensional microelectrodes. *Energies*. 7(7):4694-4709.
- Sophia AC, Sreeja S. 2017. Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 21:59-66.
- Strik DPBTB, Terlouw H, Hamelers HVM, Buisman CJN. 2008. Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC). *Applied Microbiology and Biotechnology*. 81(4):659-668.
- Strik DPBTB, Timmers RA, Helder M, Steinbusch KJJ, Hamelers HVM, Buisman CJN. 2011. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*. 29(1):41-49.
- Sugnaux M, Happe M, Cachelin CP, Gasperini A, Blatter M, Fischer F. 2017. Cathode deposits favor methane generation in microbial electrolysis cell. *Chemical Engineering Journal*. 324:228-236.
- Tang N, Hong W, Ewing T, Beyenal H, Kim JH, Heo D. 2015. A self-sustainable power management system for reliable power scaling up of sediment microbial fuel cells. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 30(9):4626-4632.
- Ter Heijne A, Liu F, van der Weijden R, Weijma J, Buisman CJN, Hamelers HVM. 2010. Copper recovery combined with electricity production in a microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. 44(11):4376-4381.
- Thirty-second annual meeting of the Society of American Bacteriologists. 1931. *Journal of Bacteriology*. 21(1):1-60.
- Tommasi T, Lombardelli G. 2017. Energy sustainability of microbial fuel cell (MFC): a case study. *Journal of Power Sources*. 356:438-447.
- Uggetti E, Puigagut J. 2016. Photosynthetic membrane-less microbial fuel cells to enhance microalgal biomass concentration. *Bioresource Technology*. 218:1016-1020.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2017. *World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables*. New York: United Nations; [consultado 6 julio 2017]. Working Paper No. ESA/P/WP/248. [https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_KeyFindings.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf).
- Velasquez-Orta SB, Werner D, Varia JC, Mgana S. 2017. Microbial fuel cells for inexpensive continuous in-situ monitoring of groundwater quality. *Water Research*. 117:9-17.
- Volta A. 1800. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions: Royal Society of London*. 90:403-431.
- Web of Science. 1945-. Version 5.25. United States: Clarivate Analytics. [consultado 6 julio 2017]. <http://wos.fecyt.es/>.
- Wen D, Eychmüller A. 2016. Enzymatic biofuel cells on porous nanostructures. *Small*. 12(34):4649-4661.

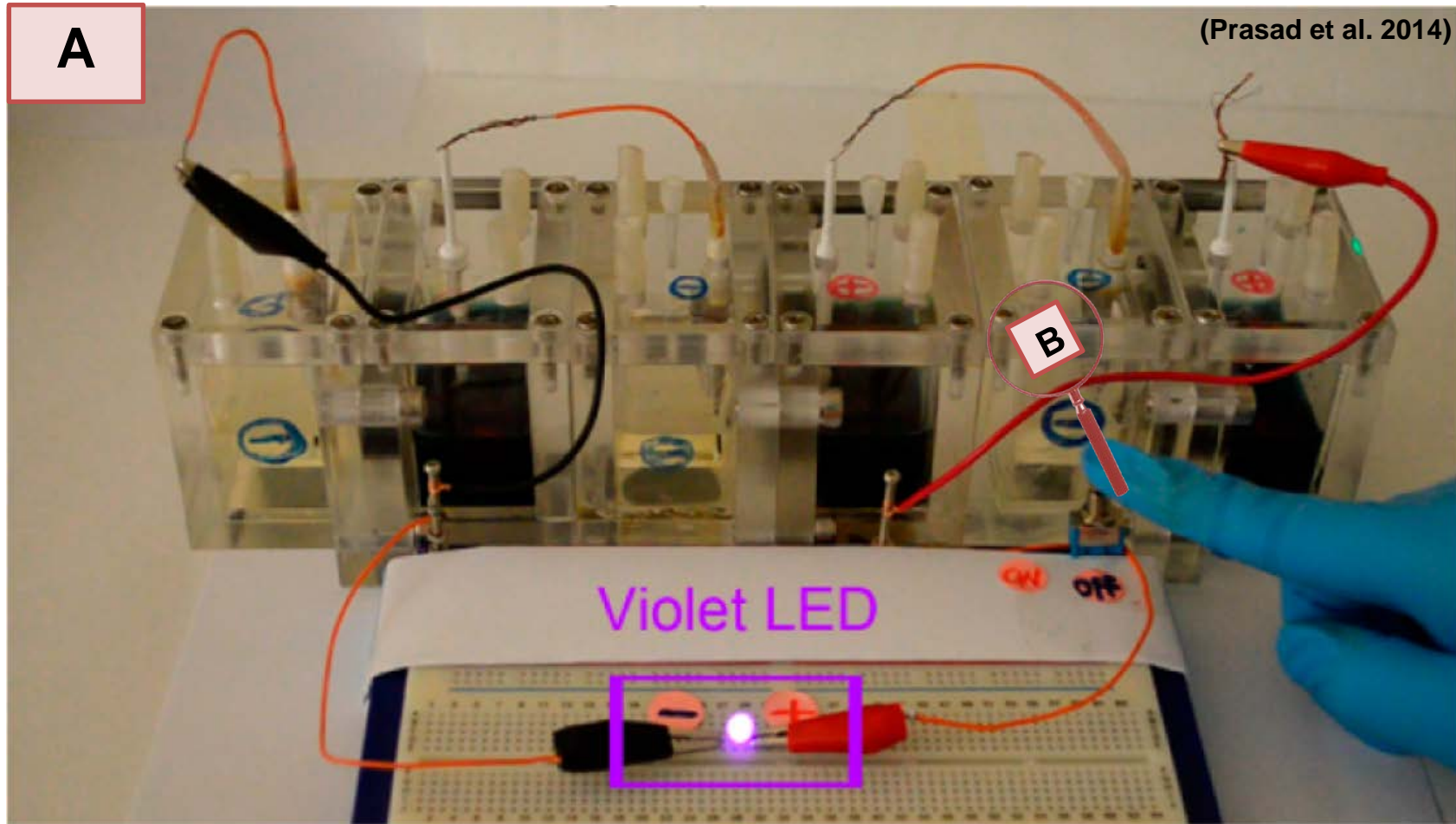
- Wetser K, Dieleman K, Buisman C, Strik D. 2017. Electricity from wetlands: tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*. 185:642-649.
- Yahiro AT, Lee SM, Kimble DO. 1964. Bioelectrochemistry: I. Enzyme utilizing bio-fuel cell studies. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA): Specialized Section on Biophysical Subjects*. 88(2):375-383.
- Yang WY, Wei XJ, Choi S. 2016. A dual-channel, interference-free, bacteria-based biosensor for highly sensitive water quality monitoring. *IEEE Sensors Journal*. 16(24):8672-8677.
- Ye TR, Song N, Chen M, Yan ZS, Jiang HL. 2016. No enhancement of cyanobacterial bloom biomass decomposition by sediment microbial fuel cell (SMFC) at different temperatures. *Environmental Pollution*. 218:59-65.
- Yu B, Tian J, Feng L. 2017. Remediation of PAH polluted soils using a soil microbial fuel cell: influence of electrode interval and role of microbial community. *Journal of Hazardous Materials*. 336:110-118.
- Zabihallahpoor A, Rahimnejad M, Talebnia F. 2015. Sediment microbial fuel cells as a new source of renewable and sustainable energy: present status and future prospects. *Royal Society of Chemistry Advances*. 5(114):94171-94183.
- Zhao Q, Li RY, Ji M, Ren ZJ. 2016. Organic content influences sediment microbial fuel cell performance and community structure. *Bioresource Technology*. 220:549-556.
- Zheng HY, Wang N, Wu J. 2017. Minimizing deep sea data collection delay with autonomous underwater vehicles. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 104:99-113.
- Zou YJ, Pisciotta J, Billmyre RB, Baskakov IV. 2009. Photosynthetic microbial fuel cells with positive light response. *Biotechnology and Bioengineering*. 104(5):939-946.

## ANEXO I. Componentes *EBFCs*

Representación de los componentes y reacciones que tienen lugar en una *EBFC*.

### Índice Anexo I

<b>Anexo I</b> [1/2].....	<b>27</b>
Figura A. Configuración externa <i>EBFCs</i> .....	27
<b>Anexo I</b> [2/2].....	<b>28</b>
Figura B. Reacciones generadoras de electricidad en una <i>EBFC</i> .....	28

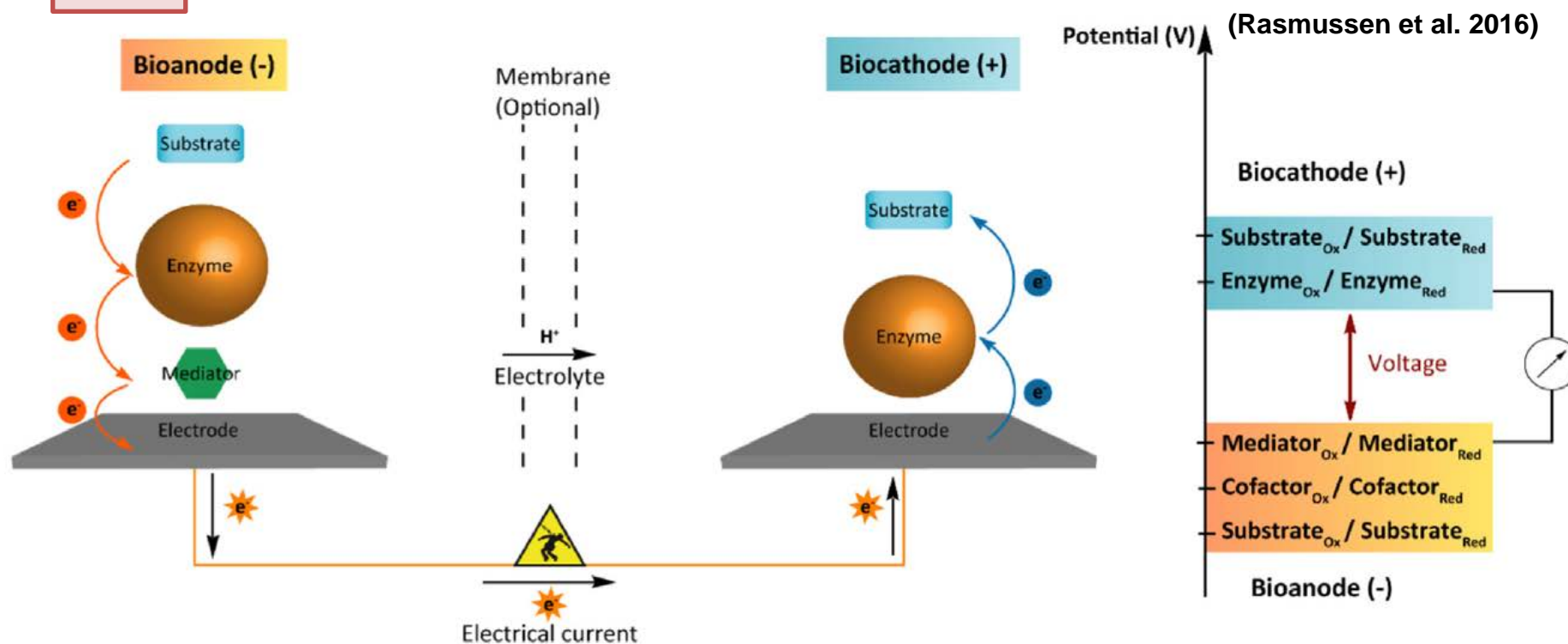


**Figura A. Configuración externa EBFCs**

Cada EBFC está conformada por una cámara catódica (+) y una cámara anódica (-). Estos compartimentos contienen una solución o electrolito y están conectados a través de un circuito externo con la consecuente producción de electricidad, como se muestra con el alumbramiento del LED (Prasad et al. 2014).



B



**Figura B.** Reacciones generadoras de electricidad en una EBFC

Generación de electricidad con el uso de enzimas redox como catalizadores en cátodo y ánodo (Galindo-de-la-Rosa et al. 2017). Estas enzimas transforman la energía bioquímica en electricidad (Song et al. 2014). El mecanismo se basa en el flujo de electrones entre enzima y electrodo, de modo directo o con el empleo de un mediador (Wen and Eychmüller 2016), producidos por la oxidación de biocombustibles en el ánodo (e.g. glucosa), y que finalizan reduciendo oxidantes en el cátodo (e.g. oxígeno) (Prasad et al. 2014).

## ANEXO II. Componentes *MECs*

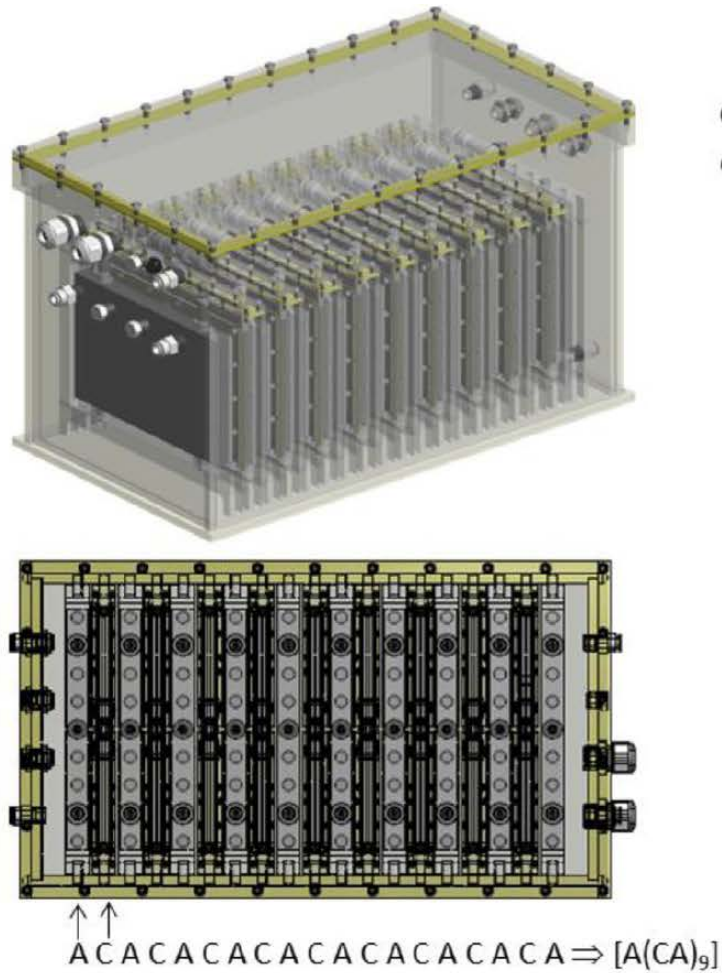
Representación de los componentes y reacciones que tienen lugar en una *MEC*.

### Índice Anexo II

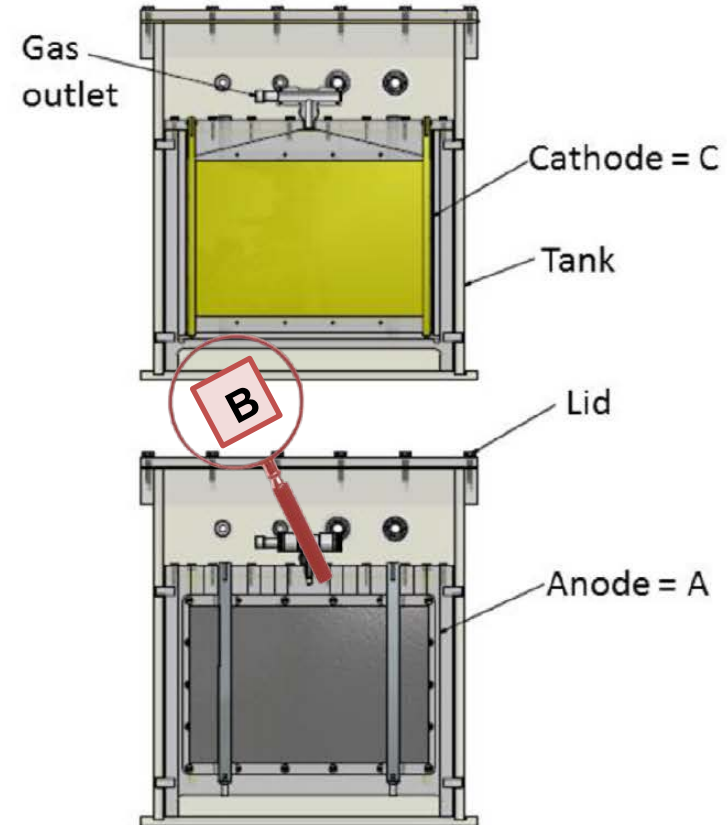
<b>Anexo II</b> [1/2].....	<b>30</b>
Figura A. Configuración externa <i>MECs</i> .....	30
<b>Anexo II</b> [2/2].....	<b>31</b>
Figura B. Reacciones generadoras de H <sub>2</sub> en una <i>MEC</i> .....	31

## ANEXO II <sub>[1/2]</sub>

A



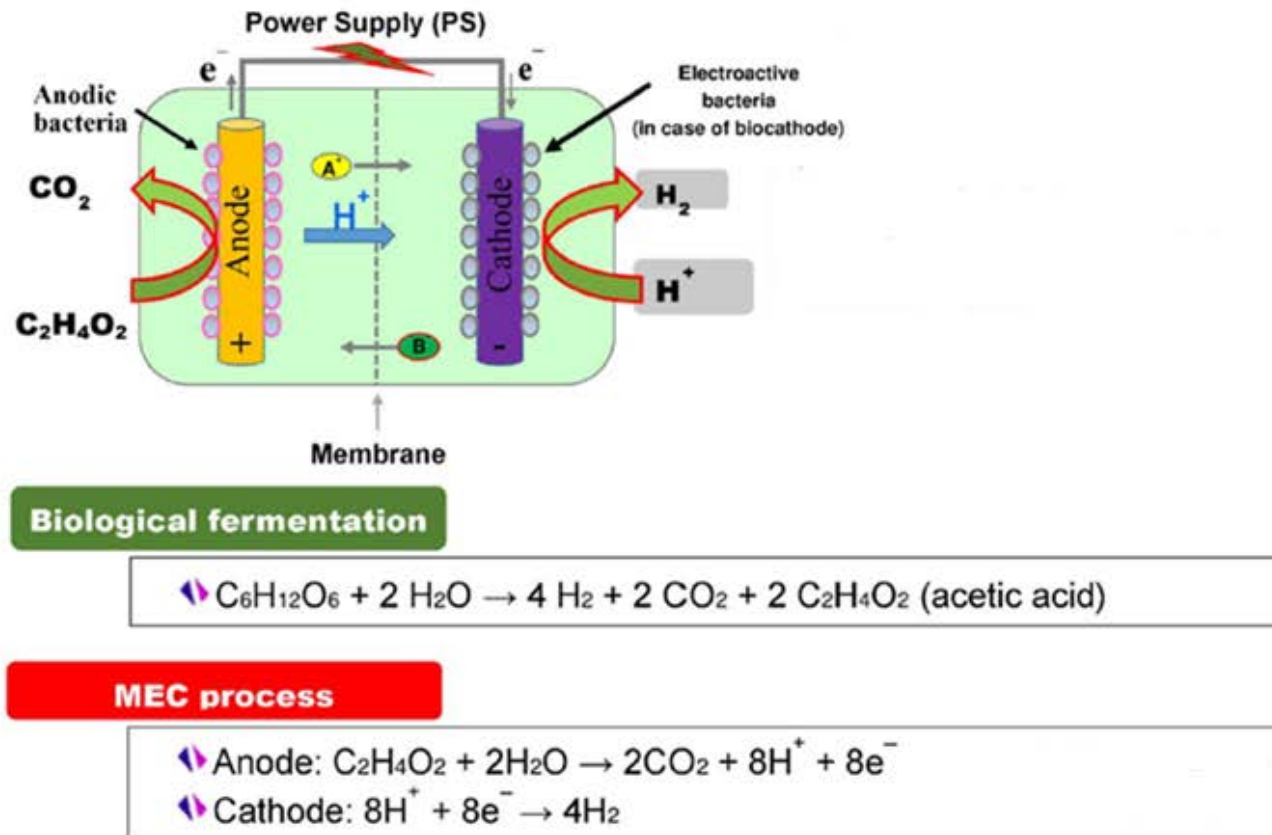
(Sugnaux et al. 2017)



**Figura A. Configuración externa MECs**

Se muestra una MEC conformada por varias cámaras catódicas y anódicas en sucesión, separadas mediante membrana. Así mismo, se aprecian las características de la cámara catódica, con una salida de gas en la parte superior y de la cámara anódica (Sugnaux et al. 2017).

(Kumar et al. 2017)



**Figura B.** Reacciones generadoras de H<sub>2</sub> en una MEC

En las MECs, las bacterias localizadas en el ánodo pueden oxidar en condiciones de anaerobiosis sustratos como azúcares, ácidos orgánicos o aguas residuales (Kumar et al. 2017). Los electrones resultantes fluyen hasta alcanzar los aceptores terminales del cátodo (Rivera et al. 2017), obteniéndose gas H<sub>2</sub> (Kumar et al. 2017). Sin embargo, esta reacción es un proceso termodinámicamente no espontáneo y por ello, se debe suplementar con voltaje de modo externo para que se lleve a cabo (Kumar et al. 2017).

## ANEXO III. Componentes *SMFCs* y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas

Componentes y reacciones que tienen lugar en una *SMFC* y representación de la idealización de un caso con aplicaciones científicas.

### Índice Anexo III

<b>Anexo III [1/3]</b> .....	<b>33</b>
Figura A. Esquema representativo de la utilización de <i>SMFC</i> para alimentación de un sensor de temperaturas y nutrientes disueltos .....	33
<b>Anexo III [2/3]</b> .....	<b>34</b>
Figura B. Reacción en los electrodos de la <i>SMFC</i> . .....	34
<b>Anexo III [3/3]</b> .....	<b>35</b>
Figura C. Recepción datos emitidos por el sensor. ....	35

A

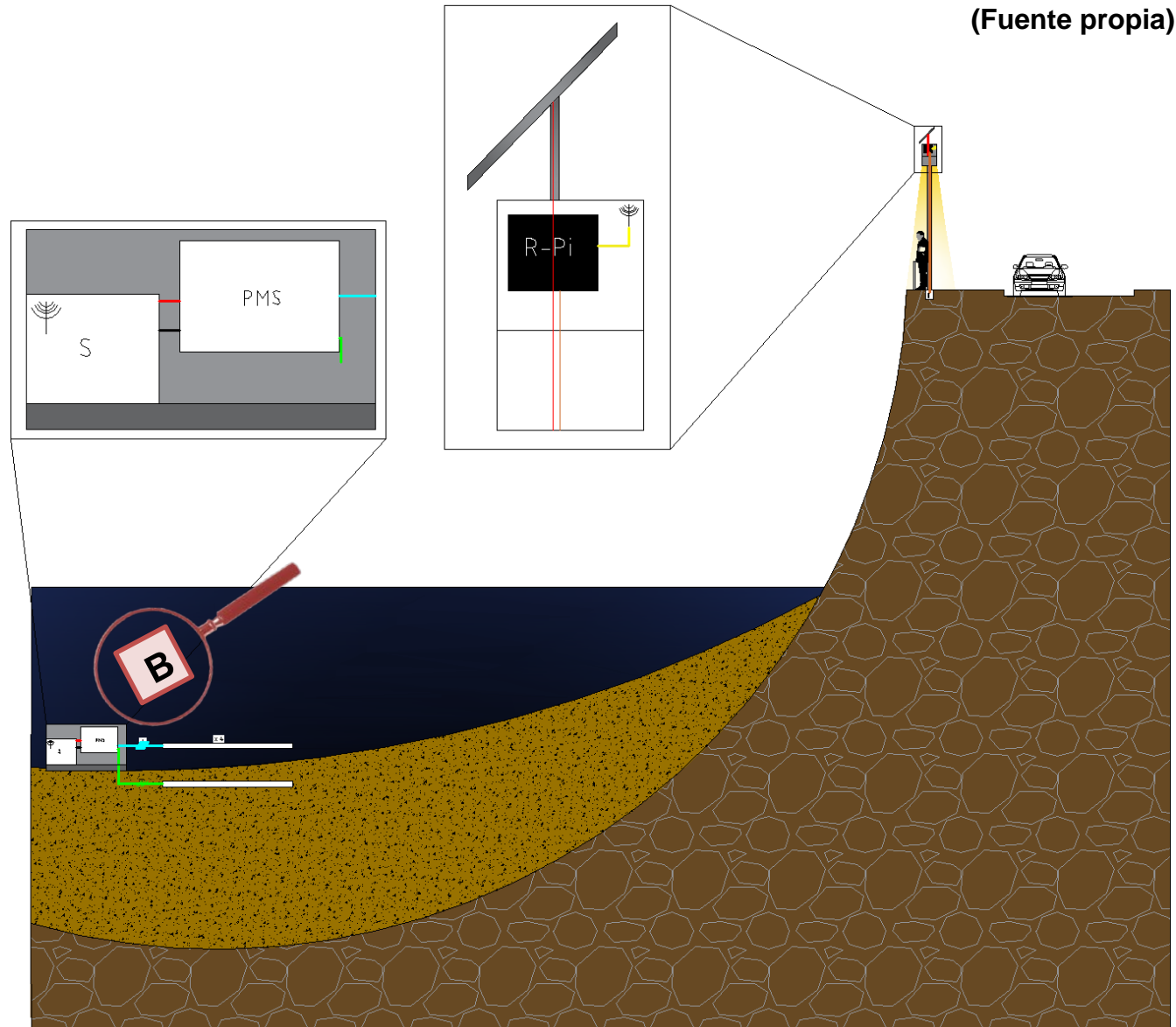
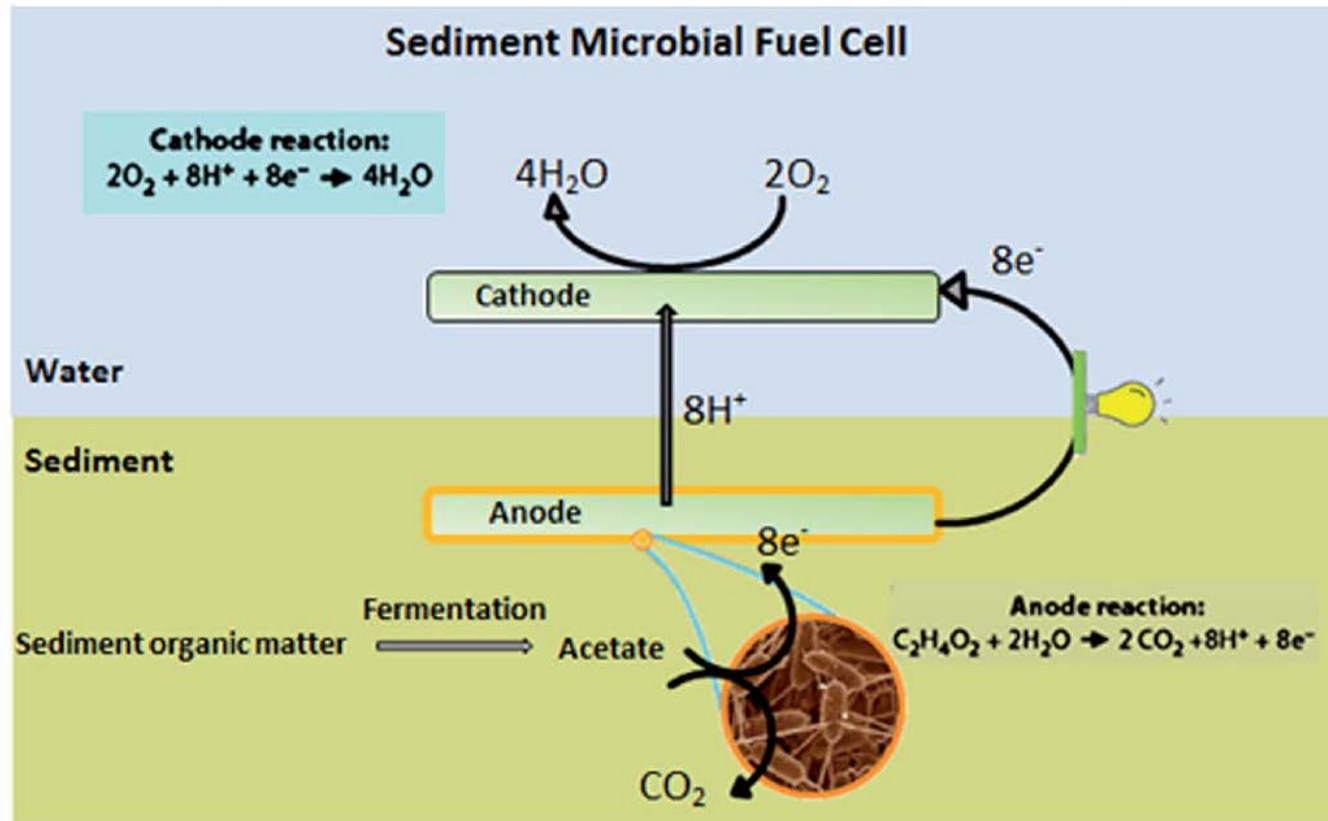


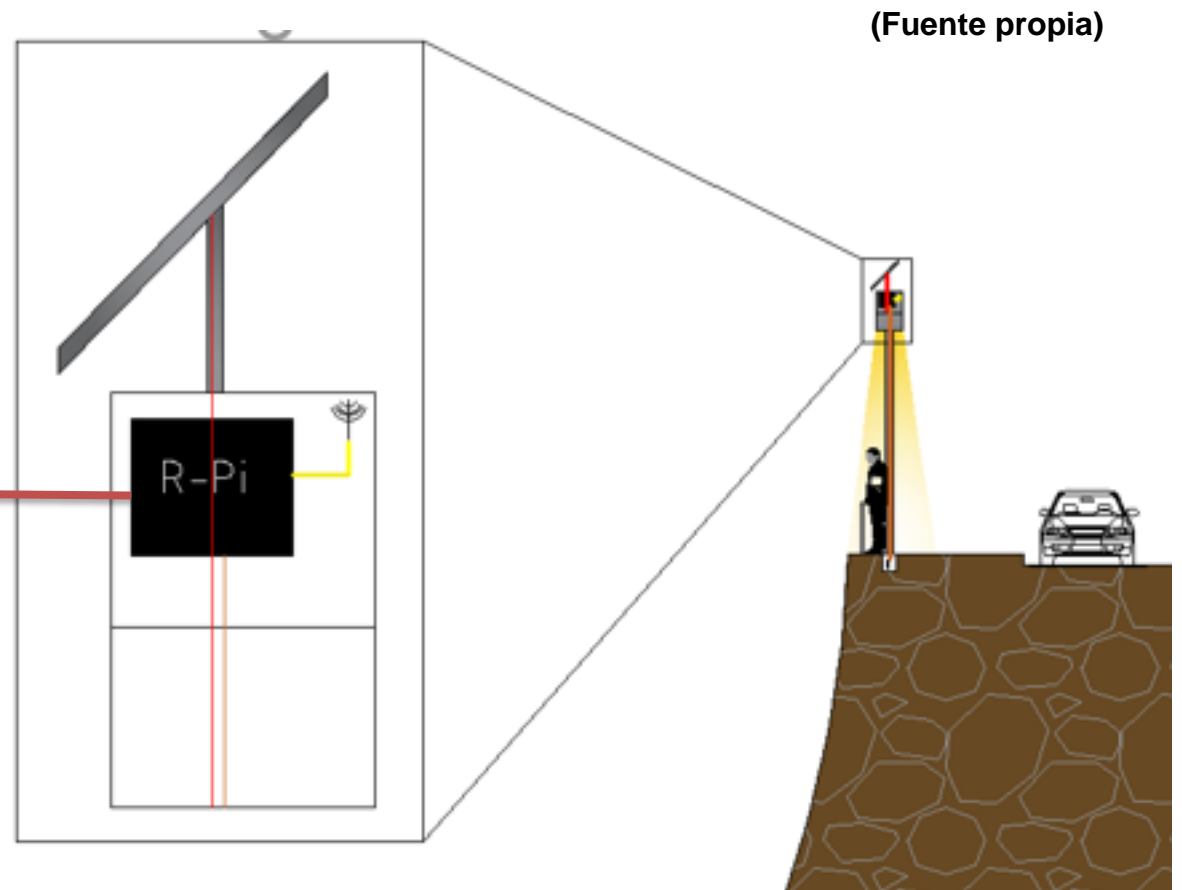
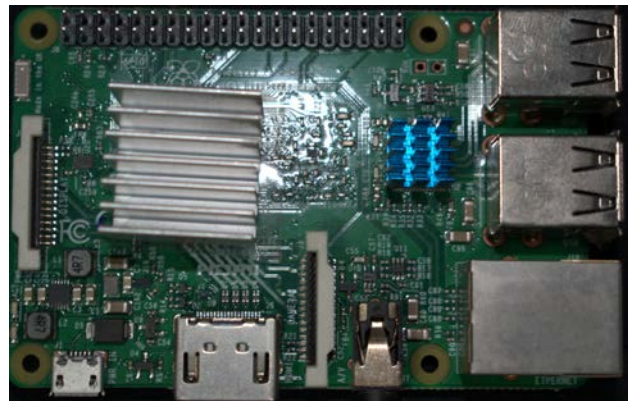
Figura A. Esquema representativo de la utilización de SMFC para alimentación de un sensor de temperaturas y nutrientes disueltos



**Figura B.** Reacción en los electrodos de la SMFC

La SMFC aprovecha el gradiente de potencial existente entre los sedimentos y el agua superficial oxigenada que se da en muchos medios naturales (Moqsud et al. 2015). Para la obtención de electricidad el ánodo se introduce en el sedimento donde se sucederán las reacciones de oxidación en condiciones anóxicas de la materia orgánica y el cátodo se dispone flotando en el agua, para que se lleve a cabo la reducción de oxígeno u otros aceptores (Tommasi and Lombardelli 2017). Como resultado se obtiene electricidad, que en este caso se proporciona a un PMS que alimentará al sensor de manera autosostenible.





**Figura C. Recepción datos emitidos por el sensor**

Para la recepción de los datos del sensor, se puede instalar un miniordenador denominado *Raspberry Pi 3* en una farola alimentada por placas solares, debido a su bajo consumo, ligereza y rapidez (Soltmann and Hall 2017). De modo que procesa y almacena los datos y los retransmite al receptor programado.

## ANEXO IV. Componentes *PMFCs*

Representación de los componentes y reacciones que tienen lugar en una *PMFC*.

### Índice Anexo IV

<b>Anexo IV</b> [1/2] .....	<b>37</b>
Figura A. <i>PMFCs</i> implantadas en el medio natural .....	37
<b>Anexo IV</b> [2/2] .....	<b>38</b>
Figura B. Reacciones generadoras de electricidad en una <i>PMFC</i> . .....	38

## ANEXO IV <sup>[1/2]</sup>

A

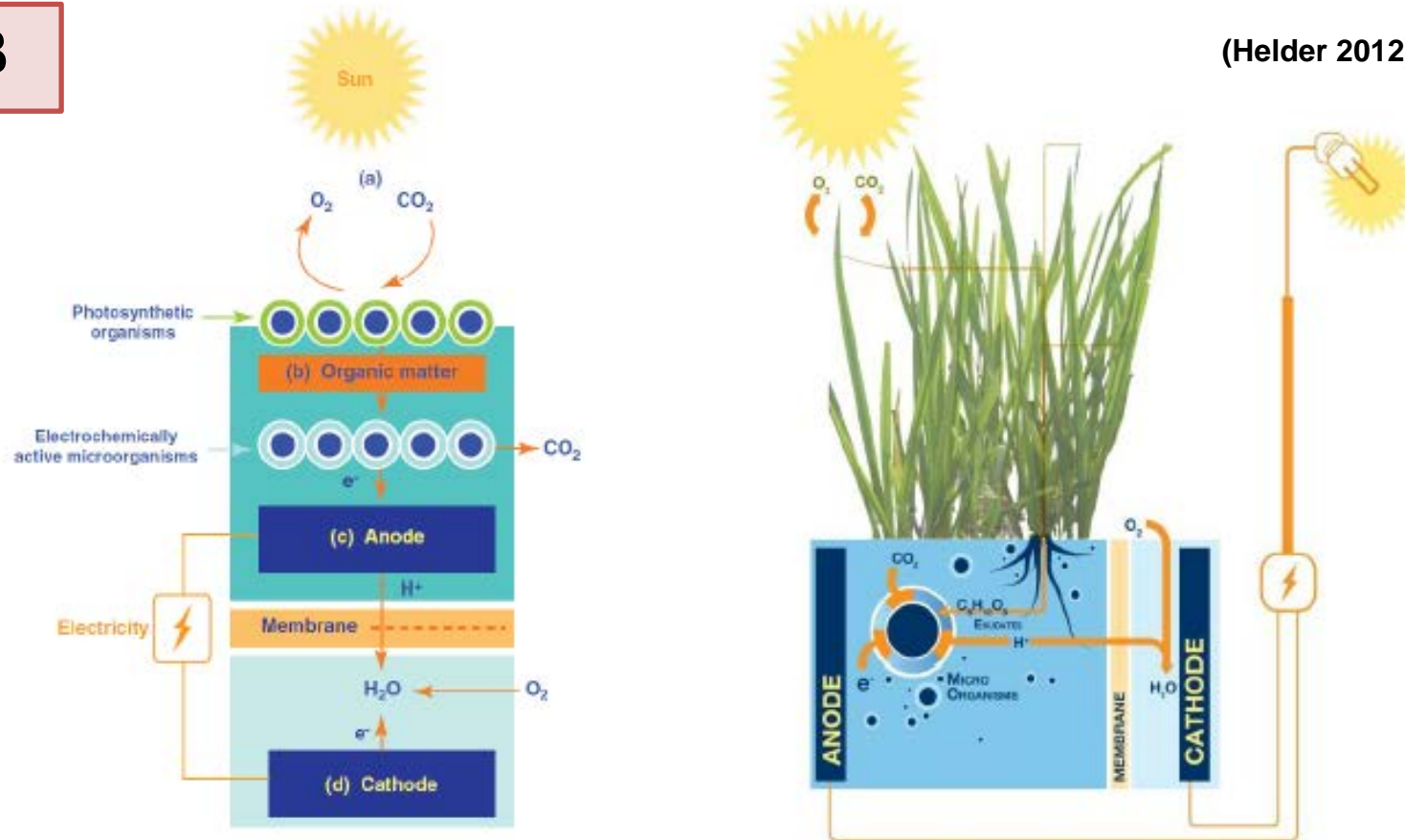
(Wetser et al. 2017)



**Figura A.** *PMFCs* implantadas en el medio natural

Los tubos destacados son la estructura externa de la *PMFC*, formada por ánodo, membrana, cátodo y un tubo de silicona. Su estructura permite la implementación en ambiente natural, como un humedal (Wetser et al. 2017).

B



(Helder 2012)

**Figura B.** Reacciones generadoras de electricidad en una PMFC

Las plantas, debido al metabolismo autótrofo, producen biomasa con la energía solar, consumiendo el 40% y exudando el resto al entorno de la raíz o rizosfera (Nitisoravut and Regmi 2017). Estos exudados pueden ser utilizados directamente en el ánodo por bacterias electroactivas, presentes en las poblaciones microbianas de la rizosfera (Moqsud et al. 2015). Los electrones, fruto de la oxidación de los rizodepósitos, se transportan al cátodo donde se produce la reducción de un aceptor como el oxígeno y se genera agua (Wetser et al. 2017). Fruto de este proceso se obtiene corriente eléctrica.