

Bioelectricidad

Axel Falcón, J. Esteban Lozano y Katy Juárez

*Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
Apdo. Postal 510-3 Cuernavaca, Mor, 62250, México. katy@ibt.unam.mx*

RESUMEN

El desafío tecnológico más grande para la sociedad humana es el reemplazo de combustibles fósiles con fuentes de energía renovable y carbono neutrales. Los microorganismos son capaces de producir energía renovable sin daño del ambiente o la interferencia con suministro de alimentos. Las celdas microbianas de combustible, ofrecen la posibilidad de convertir eficientemente compuestos orgánicos en electricidad. Los microorganismos que pueden oxidar totalmente compuestos orgánicos empleando un electrodo como único aceptor de electrones, son los que contribuyen principalmente a la producción de energía. Existen varios mecanismos para la transferencia de electrones al ánodo: transferencia directa vía citocromos tipo *c* de la membrana externa, transferencia mediante nanocables bacterianos, y transportadores de electrones solubles. La investigación en esta área se ha centrado principalmente en el estudio de los mecanismos de la transferencia de electrones entre los microorganismos y el electrodo, para diseñar mejores electrodos o en la manipulación genética de microorganismos que permitan incrementar la producción de electricidad. En esta revisión abordamos el tema de la producción de bioelectricidad y los avances y los retos tecnológicos que hay que vencer para convertirla en una fuente de energía renovable competitiva.

Palabras Clave: Celdas microbianas, Bioelectricidad, Energía renovable

ABSTRACT

The greatest technological challenge for today's human society is the replacement of fossil fuels with energy sources that are renewable and carbon neutral. Microorganisms can produce renewable energy without damaging the environment or disrupting food supply. Microbial fuel cells offer the possibility of efficiently converting organic compounds into electricity. Microorganisms that can completely oxidize organic compounds with an electrode serving as the sole electron acceptor are the primary contributors to power production. Several mechanisms for electron transfer to anodes have been proposed including: direct electron transfer via outer-surface *c*-type cytochromes, long-range electron transfer via microbial nanowires, electron flow through a conductive biofilm matrix containing cytochromes, and soluble electron shuttles. Research in this area is focusing on elucidating the mechanisms of electron transfer between the microorganisms and the electrode in order to design better electrodes or genetically engineer better microbes for higher rates of electricity production. In this review we are examining the advances of the

bioelectricity generation and the technological challenges that there are to face in order to turn it into a competitive renewable energy source.

Key words: MFC, Bioelectricity, Renewable energy

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía en el mundo y el uso excesivo de combustibles fósiles han provocado serios problemas de contaminación ambiental y el calentamiento global de la tierra. Por lo que en la actualidad, numerosos grupos de investigación a nivel mundial se han enfocado en la búsqueda de fuentes alternas de energía que contribuyan de manera sustentable a mitigar dicha demanda. Sin embargo, aun no se cuenta con la infraestructura ni la tecnología necesaria para dejar de depender del petróleo como fuente principal de energía. Una de las consideraciones importantes, en la búsqueda de fuentes alternativas, es la liberación de CO₂ a la atmósfera, ya que algunas de ellas, como por ejemplo el proceso de combustión de los hidrocarburos contenidos en el petróleo libera grandes cantidades de CO₂, favoreciendo problemas como el calentamiento global. Debido a lo anterior, se busca que las nuevas tecnologías de producción de energía sean carbono-neutrales, es decir que solo liberen el carbono recién fijado a la atmósfera. En los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías que se enfocan en la utilización de la energía acumulada en la biomasa de desechos, para ser redirigida a otras formas de energía que la humanidad pueda utilizar como son: la

metanogénesis (CH₄), el biohidrógeno (H₂) y la bioelectricidad (Logan *et al.*, 2006).

Las celdas de combustible microbianas, conocidas también como MFC por sus siglas en inglés (Microbial Fuel Cell), resultan ser una opción prometedora para la generación de energía renovable que se pueda emplear como electricidad (Logan & Regan, 2006). Avances importantes se han logrado para incrementar la eficiencia de estos dispositivos tanto para la generación de electricidad como para la generación de hidrógeno, empleándolas como celdas de electrólisis microbianas o MEC por sus siglas en inglés (Microbial Electrochemical Cell) (Liu *et al.*, 2005b). Una gran variedad de substratos se han empleado en el ánodo para la generación de energía, incluyendo acetato, celulosa, aguas residuales municipales e industriales, etc. Se ha mejorado la tecnología y funcionamiento de la celda misma, sin embargo un factor común y que tiene gran relevancia, es la formación de la biopelícula microbiana en el ánodo (Kim *et al.*, 2006). Se han identificado y caracterizado el tipo de organismos que conforman los consorcios bacterianos que participan en la formación de la biopelícula y de manera importante en el aporte de energía (Lovley, 2008). Aunque existen estudios de la ecología microbiana de dicha biopelícula, las relaciones entre los miembros de las comunidades microbianas y como

contribuyen al flujo de electrones del ánodo al cátodo, aun no están completamente comprendidas, así como los mecanismos que favorecen su formación y los procesos metabólicos que intervienen en su establecimiento. Los cultivos mixtos se sabe que generan una mayor energía en comparación al empleo de cultivos puros, esto se debe a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo y a la participación de cepas con capacidades metabólicas complementarias (Lee *et al.*, 2003). Reportes recientes describen que biopelículas constituidas por consorcios enriquecidos, han generado densidades de potencia de hasta 6.9 W por m² (área

expuesta del ánodo) lo cual lo acerca incluso a los límites teóricos (Logan, 2009).

En este trabajo hacemos una revisión de los avances realizados en el campo de la bioelectricidad empleando MFCs, analizando los aspectos generales, las limitaciones y los retos que presentarán en esta área de investigación en el futuro.

ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA MFC

La estructura básica de una MFC para la producción de electricidad se puede observar en la Fig. 1; consta de dos cámaras una catódica y una anódica separadas por una membrana de intercambio de protones (MIP) (Min *et al.*, 2005).

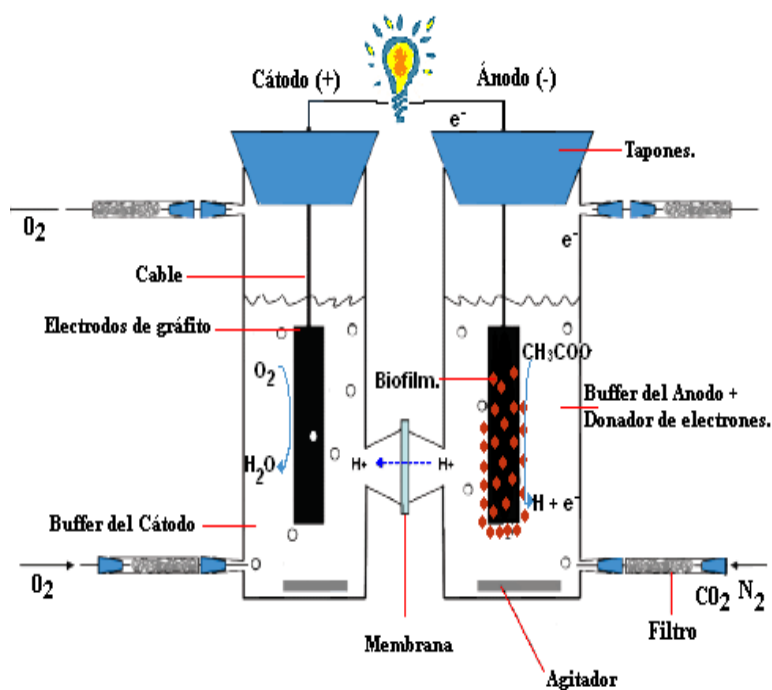


Fig. 1. Esquema de celda de combustible microbiana (MFC) tipo H. Los microorganismos en la cámara anódica oxidan los compuestos orgánicos como parte de su metabolismo y durante este proceso generan electrones y protones. Los electrones son transferidos al ánodo y son transportados a hacia el cátodo a través de un circuito externo. Para mantener el balance de cargas, los protones generados en la reacción atraviesan una membrana permeable a protones o un puente salino y una vez en la cámara catódica se unen con el oxígeno, para formar agua (Logan *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2000a)

El mecanismo por el cual son liberados los electrones al electrodo en las MFCs es uno de los principales objetivos de estudio para llegar a entender el funcionamiento de este tipo de dispositivos y mejorar su eficiencia. El factor más importante para que una MFC genere una corriente de electrones que pueda ser utilizada es, sin duda alguna, el microorganismo o microorganismos utilizados para llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica a compuestos como CO_2 y H_2O y la liberación de electrones al sistema. Otro factor es el tipo de inóculo, se pueden emplear diferentes tipos de inóculos en las MFCs. El inóculo puede provenir de lodos activados (Lee *et al.*, 2003), lodos anaeróbicos (Rabaey *et al.*, 2003), aguas residuales domésticas (Min & Logan, 2004), aguas residuales industriales (Prasad *et al.*, 2006) sedimentos marinos (Bond *et al.*, 2002) o sedimentos acuáticos (Holmes *et al.*, 2004). Aunque los mejores resultados se han obtenido empleando lodos activados o anaeróbicos (Rabaey *et al.*, 2003).

Ánodo

Los materiales con los que se deben construir los ánodos deben ser conductivos, biocompatibles y químicamente estables en la solución del reactor. Ánodos metálicos consistentes de malla de acero inoxidable no corrosivo pueden ser utilizados. El material de electrodo más versátil es el carbón, disponible como placas de grafito compacto, barras o gránulos.

Los materiales utilizados más simples son las placas y las barras de grafito ya que son

relativamente baratos, fáciles de manejar y tienen un área de contacto definida. Diversos tipos de productos de carbón como son papel, fibra, entre otros han sido utilizados extensivamente como electrodos. Mayores áreas superficiales pueden ser alcanzadas usando materiales compactos como carbón vítreo reticulado, el cual se encuentra disponible con diferentes tamaños de poro o usando capas de gránulos de carbón o esferas. El efecto a largo plazo del crecimiento de la biopelícula o de las partículas en el flujo en cualquiera de las superficies no ha sido debidamente examinado todavía.

Para incrementar el desempeño del ánodo, diferentes estrategias químicas y físicas han sido utilizadas. Materiales electrocatalíticos como son compuestos de polianilinas han mostrado que mejoran la generación de corriente ayudando a la oxidación directa de metabolitos microbianos. Dirigir el flujo de agua a través del material del ánodo puede utilizarse para incrementar la potencia. El flujo hacia el ánodo ha sido también usado en reactores utilizando mediadores exógenos. (Sell *et al.* 1989)

Cátodo

Debido a su buen desempeño, ferrocianuro es muy popular como un aceptor experimental de electrones en MFCs. La ventaja del ferrocianuro es el bajo sobrepotencial, y la desventaja de su empleo es la oxidación insuficiente por oxígeno, el cual requiere el catolito para ser regularmente reemplazado. El desempeño a largo plazo del sistema puede ser afectado

por difusión del ferrocianuro a través de la MIP y en la cámara anódica.

El oxígeno es el aceptor más adecuado de electrones para una MFC debido a su alto potencial de oxidación, disponibilidad, bajo costo, sustentabilidad, y la carencia de residuos químicos. La elección del material del cátodo afecta de manera importante el desempeño, y su variedad de aplicaciones (Cheng *et al.*, 2006b) Para incrementar la velocidad de reducción de oxígeno, los catalizadores de platino son usualmente usados para oxígeno disuelto o cátodos de difusión de gas. Para bajar el costo de la MFC, la cantidad de platino puede mantenerse a 0.1 mgcm^{-2} . La estabilidad a largo plazo del platino necesita ser investigada todavía. Recientemente, metales nobles han sido propuestos como cátodos para las MFCs (Logan *et al.*, 2006).

Membrana de intercambio de protones (MIP)

La mayoría de los diseños de las MFCs requieren la separación de la cámara anódica y la cámara catódica por una membrana de intercambio de protones. La MIP más comúnmente utilizada es Nafion (DuPont Co., USA) aunque existen otras opciones como Ultrex CMI-7000 que también son adecuadas para MFCs. El mercado para las MIP's esta en constante crecimiento, y más estudios se requieren para evaluar los efectos de la membrana en el desempeño y la estabilidad a largo plazo (Logan & Regan, 2006, Logan *et al.*, 2006).

Condiciones de operación

Hasta este momento, el desempeño de

las MFCs a nivel laboratorio es mucho menor que el desempeño ideal de estos sistemas. Puede haber muchas razones posibles. El desempeño de una MFC es alterado por muchos factores incluyendo el tipo de microbios utilizados, el tipo y concentración de biomasa utilizada como combustible, fuerza iónica, pH, temperatura, y la configuración del reactor. (Liu *et al.*, 2005a) Los parámetros de operación pueden ser regulados para bajar la polarización para poder aumentar el desempeño de una MFC.

pH y electrolito

Sin una solución amortiguadora en una MFC, obviamente existirá una diferencia de pH entre la cámara anódica y la cámara catódica, aunque teóricamente no habría cambio de pH cuando la velocidad de reacción de protones, electrones y oxígeno en el cátodo es igual a la velocidad de producción de protones en el ánodo. La membrana de intercambio de protones causa una barrera en el transporte a través de la membrana de difusión de protones, y el transporte de protones a través de la membrana es más lenta que su velocidad de producción en el ánodo y su velocidad de consumo en la cámara catódica en la etapa inicial de la operación de la MFC, así trae una diferencia de pH. Sin embargo, la diferencia de pH incrementa la fuerza motriz de la difusión de protones de la cámara anódica a la cámara catódica y finalmente forma un equilibrio dinámico. Algunos de los protones generados con la biodegradación sustratos orgánicos transferidos a la cámara catódica pueden reaccionar con el oxígeno

disuelto mientras algunos protones son acumulados en la cámara anódica cuando ellos no se transfieren a través de la membrana de intercambio de protones o de puentes salinos rápidamente a la cámara catódica. Gil *et al.* (2003), detectó una diferencia de pH de 4.1 después de 5 horas de operación con un pH inicial de 7 sin utilizar amortiguadores. Con la adición de un amortiguador de fosfatos (pH 7), el cambio de pH en el ánodo y cátodo fue de menor de 0.5 unidades y la salida de corriente se incremento alrededor de 1 a 2 veces.

Sin embargo, el proceso microbiano anódico prefiere un pH neutral y las actividades microbianas disminuyen en un pH más alto o más bajo, por lo que el empleo de amortiguadores es fundamental (He *et al.*, 2008).

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE ELECTRONES

La transferencia extracelular de electrones se puede definir como el proceso en el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones extracelular (Lovley, 2008). Se han planteado diferentes mecanismos para explicar cómo los microorganismos liberan los electrones al electrodo: a) transferencia directa con la participación de citocromos, b) transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo y c) transferencia por medio de los nanocables bacterianos o *pili*.

a) *Transferencia directa de electrones al electrodo*

Electrígenos

Los electrígenos son microorganismos que conservan la energía permitiendo el crecimiento por la oxidación de compuestos orgánicos a dióxido de carbono y con la transferencia directa de electrones a los ánodos de las MFC. (Lovley & Kevin, 2008) Estos microorganismos son conocidos también como anodófilos. Entre los microorganismos más estudiados de esta clase se encuentran los antes mencionados *Geobacter* y *Rhodofera*; los cuales poseen mecanismos de transporte de electrones internos y no requieren la ayuda de mediadores para liberar dichos electrones al ánodo. La producción de electricidad utilizando microorganismos electrígenos en MFC tiene algunas ventajas significativas (Bond & Lovley, 2003). Una de ellas es la completa oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono que estos microorganismos hacen posible y que se traduce en una alta eficiencia coulombica en el proceso (Lovley & Nevin, 2008). Otra ventaja utilizando electrígenos es su sustentabilidad a largo plazo. Se han reportado MFCs que han sido operadas por más de 2 años sin bajar la producción de electricidad (Lovley & Nevin, 2008).

La reacción de una MFC que se lleva a cabo en el ánodo sin mediadores se ha estudiado principalmente en los *Geobacteraceae*, en este proceso el ánodo actúa como aceptor final de electrones de manera similar a como lo hacen con los óxidos minerales

sólidos que se encuentran en el subsuelo, su hábitat natural. Los *Geobacteraceae* son un grupo de microorganismos capaces de acoplar la respiración anaeróbica a la reducción de metales en el ambiente. Debido a su metabolismo son capaces de biorremediar varios metales pesados incluyendo Uranio(VI), Vanadio(VI) Cromo(VI); así como biodegradar varios contaminantes orgánicos como por ejemplo los hidrocarburos monoaromáticos. Recientemente dicha especie se ha usado para generar electricidad a partir de desechos orgánicos, ya que su metabolismo único la hace sobresaliente en este campo (Lovley, 2008).

Geobacter pertenece a los microorganismos reductores de metales, los cuales producen energía útil biológicamente en forma de ATP durante la reducción de óxidos de metales bajo condiciones anaerobias en suelos y sedimentos. Su característica principal es la habilidad para oxidar compuestos orgánicos como ácidos grasos, alcoholes, compuestos monoaromáticos por la vía de los ácidos tricarbóxicos, mediante la transferencia de electrones a óxidos de Fe(III) insolubles, sustancias húmicas u óxidos de Mn(IV) (Nevin & Lovley 2002, Lovley 2008).

La mayoría de los estudios relacionados con la transferencia de electrones se han hecho utilizando *Geobacter sulfurreducens*, ya que su genoma se conoce completamente y se sabe que es un gran generador de potencia. La manera en que esta bacteria transfiere electrones al electrodo, es a través de una serie de citocromos tipo c (mas de

100 codificados en su genoma), asociados a la membrana interna, periplasma y membrana externa (Methe *et al.*, 2003, Lovley, 2008).

Rhodofera ferrireducens, es también una bacteria de especial importancia en la producción de bioelectricidad, fue aislada de sedimentos del subsuelo como un reductor de Fe(III), oxida azúcares como glucosa, fructosa, sacarosa, lactosa y xilosa a CO₂ con el 80% de la recuperación de los electrones en forma de electricidad. La gran producción de energía le es atribuida a la cantidad de células adheridas a la superficie del electrodo durante largos periodos de tiempo y a su habilidad para mantenerse activa. Por lo que, debido a la conversión de varios tipos de azúcares a electricidad y a su capacidad de mantenimiento sin disminuir su desempeño, *Rhodofera* es un candidato ideal para ser utilizado en MFCs. (Du *et al.*, 2007, Chaudhuri & Lovley, 2003; Risso *et al.*, 2009).

b) Transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo

Un mediador es un compuesto que puede entrar en la célula, aceptar electrones de varios acarreadores intracelulares de electrones, salir de la célula en estado reducido y entonces donar los electrones al ánodo. Estos mediadores juegan un papel fundamental en la transferencia de electrones en aquellos microorganismos que son incapaces de transferir electrones al ánodo directamente.

-Mediadores producidos por el mismo microorganismo

Los microorganismos que tienen la capacidad de reducir Fe(III) enfrentan el problema de cómo tener acceso efectivamente a un aceptor de electrones que no puede difundirse a la célula. Las bacterias del género *Shewanella* han resuelto este problema liberando quinonas solubles que pueden acarrear electrones de la superficie celular a óxido de Fe(III) aunque éste se encuentre a una distancia considerable de la célula. Se ha reportado que *Shewanella* tiene la capacidad de transferir electrones a metales localizados a más de 50 μm de la superficie de la célula (Nevin & Lovley, 2002).

Las bacterias del género *Shewanella* son miembros de las γ -Proteobacterias son microorganismos acuáticos con una amplia distribución alrededor del mundo: forman un grupo diverso de bacterias anaerobias facultativas que se encuentran en ambientes marinos y de agua dulce (Hau & Gralnick, 2007). Son fisiológicamente diversos, por lo que pueden tener varias aplicaciones biotecnológicas, como son, la bio-remediación de compuestos clorados, radioactivos y otros contaminantes ambientales, así como la generación de energía.

Los *Shewanellae* pueden respirar empleando un diverso grupo de aceptores de electrones lo que les ha permitido adaptarse a ambientes extremos y variados. Estos organismos son fáciles de crecer y manejar en un laboratorio, por lo que muestran un

gran potencial para la biorremediación de varios contaminantes ambientales y en las MFCs para producir electricidad.

Diversos estudios han sugerido que las células de *Shewanella* tienen la capacidad para producir y secretar acarreadores endógenos de electrones para promover la reducción de óxidos de Fe(III), aunque dichos compuestos no han sido totalmente identificados han surgido reportes que intentan identificarlos. Recientemente se demostró que este microorganismo produce flavinas que emplean como mediadores para la transferencia de electrones fuera de la célula (Marsili *et al.*, 2008; Von Canstein *et al.*, 2007).

El mecanismo de transferencia de electrones hacia la superficie del electrodo, por esta bacteria, no ha sido elucidado, pero son de vital importancia los citocromos localizados en la membrana externa y las rutas de secreción tipo II. Sin embargo, se cree que los nanocables o *pili* de *Shewanella*, puede facilitar la transferencia de electrones en distancias muy largas. Las aplicaciones de esta bacteria en los aparatos generadores de corriente incluyen el tratamiento de aguas residuales, la conversión de biomasa de deshecho y el uso como proveedor de electricidad a sensores ambientales en cuerpos acuáticos como lagos, ríos y océanos, donde los sedimentos ricos en materia orgánica proveen de una fuente de electrones (Hau & Gralnick, 2007).

-Mediadores adicionados exógenamente

En el caso de microorganismos que no son capaces de producir sus propios mediadores y que son incapaces de transferir eficientemente los electrones derivados del metabolismo central afuera de la célula, requieren de la adición de mediadores exógenos que transporten los electrones al ánodo.

Las propiedades que se buscan en un compuesto para ser utilizado como un buen mediador son: Un potencial bastante diferente del potencial del organismo para facilitar la transferencia de electrones mientras se mantiene un alto potencial electroquímico en la celda, un alto coeficiente de difusión en el electrolito y en la membrana celular, rápida transferencia de electrones de el organismo al electrodo, capacidad para repetidos ciclos redox, no citotoxicidad y buenos perfiles de absorción-adsorción-resorción al organismo, electrodo y otras superficies de la MFC, de forma que permanezca en la solución y permanezca disponible para el proceso. (Bullen *et al.*, 2006). Ejemplos de compuestos de este tipo son; rojo neutro, fenazinas, fenotiazinas, benzilviolágeno, entre otros (Lovley, 2006).

Existen varios problemas y desventajas en el uso de mediadores para facilitar el transporte de electrones, entre ellos se encuentra el hecho de que los compuestos utilizados suelen ser tóxicos para los seres humanos, por lo que se debe evitar utilizar estos compuestos en los procesos de producción de electricidad en lugares que se exponga el medio ambiente a ellos, como puede ser en plantas de tratamiento de

aguas residuales, sedimentos acuáticos, entre otros.

Otra desventaja es el corto tiempo que se mantienen estables estos compuestos, lo cual, limita el tiempo de vida de la MFC. Además, incluso en presencia de mediadores los microorganismos fermentativos producen ácidos por fermentación, lo que eventualmente desestabiliza el sistema, ya que la mayoría de los electrones presentes inicialmente en el combustible se recuperan en la fermentación de estos ácidos, en mayor cantidad que como electricidad, y, por lo tanto, la eficiencia es baja en estos sistemas sin importar el uso de los mediadores.

c) *Transferencia por medio de los nanocables bacterianos o pili.*

En estudios recientes se ha descubierto la presencia de *nanocables* en algunos microorganismos *electriígenos*. Estos *pili* se han identificado en bacterias como *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella oneidensis*, una cianobacteria fototrófica *Synechocystis* y un microorganismo fermentador termofílico *Pelotomaculum thermopropionicum* (Gorby *et al.*, 2006)

Existen opiniones encontradas con respecto a la presencia de estas estructuras en las bacterias que pueden reducir óxidos de Fe(III) o Mn(IV). El crecimiento en Fe (III) requiere de la presencia de *pili* especializados, los cuales son conductores de electrones y se encuentran localizados a un costado de la célula. Estos *pili* son los encargados de realizar la conexión eléctrica entre la célula y los óxidos de Fe(III) y deben estar en contacto directo con el ánodo de la

MFC o formando una red entre las células para facilitar la transferencia de electrones a través de la biopelícula lo mejor posible, pues se sabe que *Geobacter* crece en monocapas y los *pili* proveen soporte estructural en la formación de dicha biopelícula y son esenciales en la generación de corriente (Lovley, 2006).

Utilizando *G. sulfurreducens* se realizó un estudio en el que se evalúa en presencia de Fe(III) soluble e insoluble la transferencia de electrones y el papel que juega la presencia o ausencia de *pili* en este proceso. *G. sulfurreducens* produce *pili* durante su crecimiento en óxido de Fe(III) pero no en Fe(III) soluble, lo que hace suponer que la producción de *pili* es una manera de alcanzar el Fe(III) no soluble en los sedimentos. Reguera *et al.* (2005), evaluaron la conductividad eléctrica a través de los *pili* mediante microscopía de fuerza atómica. (AFM por sus siglas en inglés). Los resultados en esos estudios muestran que los *pili* de *G. sulfurreducens* son altamente conductivos e indican que *Geobacter* requiere de estas estructuras para poder reducir óxidos de Fe(III) en el ambiente. Estos resultados nos llevan a pensar que la producción de apéndices conductores en bacterias que reducen óxidos metálicos es un mecanismo de transferencia de electrones de la célula hacia el aceptor externo de electrones (Reguera *et al.*, 2005).

CONSORCIOS MICROBIANOS Y SINTROFIA

La sintrofia se puede definir como la asociación o dependencia de 2 o más tipos

diferentes de organismos que combinan sus capacidades metabólicas para catabolizar un sustrato que no puede ser catabolizado por alguno de estos organismos de manera independiente. (Rittmann *et al.*, 2008, Torres *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2007). Este concepto es aplicable para las MFC ya que para dar el siguiente paso y diseñarlas para la producción a escala industrial, se debe pensar en utilizar sustratos complejos, los cuales poseen diversos nutrientes, y los microorganismos utilizados deben ser capaces de procesarlos o por lo menos no verse afectados por su presencia. Un buen ejemplo de esto es la producción de metano e hidrógeno o electricidad por sintrofia en sistemas de bioenergía microbianos.

La materia orgánica compleja debe ser hidrolizada y fermentada a productos simples que pueden ser convertidos directamente a los productos finales deseados. Para producir CH₄, los metanogénicos usan solo acetato o H₂ y CO₂ y todos los electrones deben ser transportados hacia H₂ y acetato. Para generación de biohidrógeno, el producto final de la fermentación debe ser H₂, lo cual significa que otros productos de la fermentación como acetato, propionato, etanol y butirato, son consumidores indeseables de electrones. La síntesis de estos productos reduce la producción global de H₂. Así mismo, la oxidación de H₂ para formar CH₄ debe ser suprimida cuando el objetivo principal es la producción de hidrógeno. □ En un proceso de este tipo, la acumulación excesiva de hidrógeno puede detener termodinámicamente el proceso de fermentación que lo produce, y por lo tanto

una simbiosis balanceada entre bacterias que producen por fermentación hidrógeno y microorganismos metanogénicos que oxidan el hidrógeno, es la clave para llevar a cabo la metanogénesis de manera efectiva. En procesos de producción de biohidrógeno, los metanogénicos deben ser suprimidos, lo cual significa que el H_2 debe ser recolectado rápidamente para evitar su acumulación. En una MFC, la acumulación de hidrógeno puede llevar a dos resultados indeseables: Disminución de la velocidad de fermentación o desviación del flujo de electrones hacia CH_4 (Freguia *et al.*, 2008).

APLICACIONES DE LAS MFC

Las MFC se encuentran en un proceso de investigación y desarrollo. Los reactores más grandes que se han reportado a la fecha, tienen un volumen interno del ánodo de 0.388 litros (Liu *et al.*, 2004b). Sin embargo, la intensa investigación que se ha venido realizando por diversos grupos de investigación a nivel mundial, ha logrado grandes avances en el desarrollo de MFC y ha encontrado usos alternativos para esta tecnología que ya pueden aplicarse para solucionar problemas de gran importancia a nivel mundial. A continuación mencionaremos algunas de las aplicaciones alternativas más importantes de las MFC.

Producción de hidrógeno

Las MFCs pueden ser modificadas de manera que se utilicen para la producción de H_2 , por medio del proceso de electrólisis, esta modificación se puede realizar mediante la remoción del oxígeno de la cámara catódica

y añadiendo un pequeño voltaje. Bajo condiciones normales de operación, los protones liberados por la reacción anódica migran al cátodo para combinarse con el oxígeno y formar agua. La generación de hidrógeno a partir de los electrones y protones producidos por el metabolismo de microorganismos en una MFC es termodinámicamente desfavorable. Por ello la aplicación de un potencial externo para incrementar el potencial del cátodo en un circuito de MFC permite superar la barrera termodinámica. Así, los protones y electrones producidos por la reacción anódica se combinan en el cátodo para formar hidrógeno (esto se logra en ausencia de oxígeno). El potencial externo requerido teórico para una MFC es 110mV, el cual es mucho menor que los 1210mV requeridos para llevar a cabo la electrólisis directa de agua a pH neutro, esto se debe a que algo de energía proviene del proceso de oxidación de la biomasa en la cámara anódica. (Du *et al.*, 2007)

Las MFCs pueden potencialmente producir alrededor de 8-9 mol H_2 /mol glucosa comparado con el típico 4 mol H_2 /mol glucosa alcanzado en fermentaciones convencionales. (Logan & Reagan, 2006, Liu *et al.*, 2005b) Entre las ventajas que presenta este sistema para la producción de hidrógeno se encuentra la mejora en eficiencia debida a la ausencia de oxígeno en la cámara catódica y que el hidrógeno producido puede ser acumulado y almacenado para su uso posterior.

Tratamiento de aguas residuales

Recientemente, el tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales ha emergido como una tecnología potencialmente interesante para la producción de energía de aguas residuales. El tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales es basado en el uso de microorganismos electroquímicamente activos. Los microorganismos electroquímicamente activos son capaces de transferir electrones extracelularmente y pueden usar este mecanismo para transferir electrones a un electrodo mientras oxidan la materia orgánica presente en las aguas residuales. Los microorganismos funcionan como un catalizador para la oxidación electroquímica de la materia orgánica, y el electrodo es por lo tanto descrito como un biánodo microbiano. El proceso de tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales puede ser modificado por una conexión eléctrica del biánodo a un electrodo auxiliar (cátodo) que desempeñará una reacción de reducción. Como resultado de esta conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo, las reacciones de los electrodos pueden ocurrir y los electrones pueden fluir del ánodo al cátodo produciendo así una corriente eléctrica (Rozendal *et al.*, 2008).

Las aguas residuales provenientes de la industria, la agricultura y de las casas contienen materia orgánica disuelta que requiere ser removida antes de ser descargada al medio ambiente. Actualmente, existen procesos para remover los contaminantes orgánicos presentes en esta agua de deshecho, la mayoría de estos procesos son tratamientos aeróbicos, los

cuales consumen grandes cantidades de energía en el proceso de aeración. Sin embargo, el tratamiento de aguas residuales ha empezado a ser reconocido como una fuente renovable para la producción de electricidad lo cual podría emplearse para el mismo proceso de tratamiento de efluentes. (Aelterman *et al.*, 2006, Logan & Reagan, 2006).

Biorremediación

Existe también la posibilidad de modificar una MFC para utilizarla en procesos de biorremediación de suelos y aguas subterráneas. Aunque hay quienes argumentan que al ser modificadas ya no son MFC reales, ya que no producen electricidad, el principio de operación es similar y se usa la tecnología de las MFCs para cumplir estos objetivos. Las bacterias no son solo capaces de donar electrones a un electrodo, también pueden aceptar electrones del mismo. Al modificar una MFC convencional, esta no se usa para producir electricidad, en lugar de esto, se aplica una corriente al sistema para llevar a cabo la reacción deseada y así remover o degradar, por ejemplo U(VI) soluble a U(IV) insoluble. Es por esto que se ha propuesto su aplicación en sitios contaminados por metales pesados como U(VI). Una estrategia simple para prevenir posibles contaminaciones con uranio es adicionar un donador orgánico de electrones, como acetato a las aguas subterráneas. El acetato estimula el crecimiento de especies de *Geobacter*, las cuales obtienen la mayoría de su energía con la oxidación del acetato y la reducción de los óxidos de Fe(III), los

cuales son abundantes en la mayoría del subsuelo. Como las aguas subterráneas que contienen U(VI) entran a una zona de adición de acetato, las especies de *Geobacter* también transfieren electrones de U(VI) soluble reduciéndolo a U(IV) el cual es altamente insoluble. Esto previene la futura migración de uranio, ya que queda secuestrado en el suelo. Así, cuando un electrodo sirve como donador de electrones al U(IV) que es producido, precipita en la superficie del electrodo. El uso de esta tecnología para este fin ayuda con los problemas de contaminación ambiental, ya que no solo previene la movilidad del uranio, si no también, se puede extraer con bicarbonato cuando se retiran los electrodos de los lugares en los que operaron y posteriormente pueden reutilizarse dichos electrodos (Gregory & Lovley, 2005; Gregory, *et al.*, 2004).

Biosensores

Datos del medio ambiente pueden ser útiles para entender y modelar respuestas de los ecosistemas, aquí nace una aplicación importante para las MFCs, las cuales pueden emplearse para monitorear ambientes de tres maneras diferentes como se explica a continuación.

Los sistemas distribuidos en ambientes naturales requieren energía para su operación. Las MFCs pueden ser usadas como dispositivos que proporcionan dicha energía, particularmente en ríos y aguas profundas marinas donde es difícil acceder de manera continua al sistema para reemplazar baterías. Celdas combustibles en

sedimentos han sido desarrolladas para monitorear sistemas ambientales como son arroyos, ríos y océanos. (Logan & Reagan, 2006)

Otra aplicación importante en el campo de los biosensores es el monitoreo de compuestos tóxicos. Las bacterias muestran una baja actividad metabólica cuando son inhibidas por compuestos tóxicos. Esta inhibición causa una baja transferencia de electrones hacia el electrodo. De esta forma, un biosensor puede ser construido, inmovilizando una bacteria en el electrodo de una MFC y protegiéndola detrás de una membrana. Si un compuesto tóxico se difunde a través de la membrana, este puede ser medido por el cambio en el potencial del sensor. Dichos sensores pueden ser de utilidad como indicadores de sustancias tóxicas en ríos o en la entrada de plantas de tratamiento de aguas. (Meyer *et al.*, 2002, Chang *et al.*, 2004, Rabaey *et al.*, 2005)

Aparte de las aplicaciones antes mencionadas, otra aplicación potencial de la tecnología de las MFCs es usarlas como un sensor para análisis de poblaciones y un control de procesos *in situ*.

PERSPECTIVAS

Las celdas microbianas de combustible son una prometedora tecnología para la generación de energía en un corto plazo. Sin embargo, análisis de la literatura muestran que el desempeño de las MFC esta limitado por diversos factores, que evitan la comercialización de esta tecnología y que la clasifican como una tecnología en desarrollo. Los problemas que actualmente restringen el

desempeño de las MFC son diversos, entre ellos se encuentra la limitación existente en su resistencia interna derivada de la transferencia de protones y su pobre cinética de reducción de oxígeno al cátodo, el escalamiento del proceso que no ha permitido diseñar MFC a gran escala que nos permitan actualmente generar las cantidades necesarias de electricidad, entre otras limitantes que se han reportado en diversos estudios. Lovley propone que el flujo de electrones en una MFC puede incrementarse hasta en 4 órdenes de magnitud si *Geobacter* transportara electrones al ánodo a la misma velocidad que lo hace hacia su aceptor natural de electrones (Holzman *et al.* 2005). Utilizando mutagénesis e incluso tecnologías de DNA recombinante se pudieran crear algunas cepas de microorganismos que cumplan con todas las funciones requeridas de manera óptima para el desarrollo de bioelectricidad en MFC. En conclusión, la tecnología de las MFC está todavía en proceso de desarrollo para la producción de electricidad de manera eficiente y a gran escala. Sin embargo, diversas aplicaciones como son biorremediación, tratamiento de aguas residuales, biosensores ya están disponibles y pueden aplicarse para resolver algunos problemas presentes en la actualidad.

La producción de bioelectricidad junto a otras tecnologías de producción de energía limpia de fuentes renovables de segunda y tercera generación se perfila como una gran alternativa para el proceso de transición de energía que se debe iniciar lo más pronto posible para evitar los efectos adversos que

la crisis energética y el calentamiento global han y seguirán desatando.

REFERENCIAS

- Aelterman PK, Rabaey P, Caluwaert P, & Verstraete, W (2006) Microbial fuel cell for wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* 54: 9-15.
- Bond DR & Lovley DR (2003) Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 1548-1555
- Bond DR, Holmes D, Tender, LM & Lovley, DR (2002) Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. *Science* 295: 483-485.
- Bullen RA, Arnot TC, Lakeman JB, Walsh FC (2006) Biofuel cells and their development. *Biosens. Bioelectron.* 21: 2015-2045.
- Chang IS, Jang JK, Gil GC, Kim M, Kim HJ, Cho BW & Kim BH (2004) Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosens. Bioelectron.* 19: 607-613.
- Chaudhuri SK & Lovley DR (2003) Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cell. *Nat Biotechnol* 21: 1229-1232
- Cheng S, Liu H & Logan BE (2006) Increased performance of single chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochem. Commun.* 8: 489-494.
- Cheng S, Liu H & Logan BE. (2006) Power densities using different cathode catalysts (Pt and CoTMPP) and polymer binders

Artículos

- (nafion and PTFE) in single chamber microbial fuel cells. *Environ Sci Technol.* 40: 364-369.
- Du Z, Li H & Gu T (2007) A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol. Adv.* 25: 464-482.
- Freguia S, Rabaey K, Yuan Z & Keller J. (2008) Syntrophic processes drive the conversion of glucose in microbial fuel cell anodes. *Environ Sci Technol.* 42: 7937-43.
- Gil GC, Chang IS, Kim BH, Kim M, Jang JK, Park HS & Kim HJ (2003) Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosens. Bioelectron.* 18: 327-334.
- Gorby YA, Yanina S, McLean JS, Rosso KM, Moyles D, Dohnalkova A, Beveridge TJ, Chang IS, Kim BH, Kim KS, Culley DE, Reed SB, Romine MF, Saffarini DA, Hill EA, Shi L, Elias DA, Kennedy DW, Pinchuk G, Watanabe K, Ishii S, Logan B, Nealson KH & Fredrickson JK. (2006) Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 103: 11358-11363.
- Gregory KB, Bond DR & Lovley DR. (2004) Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environ Microbiol.* 6: 596-604.
- Gregory KB & Lovley DR (2005) Remediation and recovery of uranium from contaminated subsurface environments with electrodes. *Environ. Sci. Technol.* 39: 8943-8947.
- Hau HH & Gralnick JA (2007) Ecology and biotechnology of the genus *Shewanella*. *Annu. Rev. Microbiol.* 61: 237-258.
- He Z, Huang Y, Manohar AK & Mansfeld F (2008) Effect of electrolyte pH on the rate of the anodic and cathodic reactions in an air-cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry.* 74: 78-82.
- Holmes DE, Bond DR, O'Neill RA, Reimers CE, Tender R & Lovley DR (2004) Microbial communities associated with electrodes harvesting electricity from a variety of aquatic sediments. *Microb. Ecol.* 48: 178-190
- Holzman DC (2005) Microbe power. *Environ. Health. Persp.* 113: A754-757.
- Kim BH, Chang SI & Gadd GM (2007) Challenges in microbial fuel cell development and operation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 76: 485-494.
- Kim HJ, Park HS, Hyun MS, Chang IS, Kim M & Kim BH (2002) A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme Microb Tech* 30: 145-52
- Kim GT, Webster G., Wimpenny WT, Kim BH, Kim HJ & Weighman AJ (2006) Bacterial community structure, compartmentalization and activity in a microbial fuel cell. *J. Appl. Microbiol.* 101: 698-710.
- Lee H, Parameswaran P & Kato-Marcus A. (2008) Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cell (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. *Water Research* 42: 1501-1510
- Lee JN, Phung T, Chang IS, Kim BH & Sung HC. (2003) Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganism and their 16s rDNA analyses. *FEMS Microbiol Lett* 223: 185-191.

Artículos

- Liu, H., & B.E. Logan (2004) Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environ Sci Technol* 38: 4040-4046
- Liu H, Cheng S & Logan BE (2005b) Power generation in fed-batch microbial fuel cell as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *Environ. Sci. Technol.* 39: 5488-5493.
- Liu H, Grot S & Logan BE (2005c) Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ. Sci. Technol.* 39: 4317-4320.
- Logan BE & Regan JM (2006) Microbial fuel cells: Challenges and applications. *Environ. Sci. Technol.* 40: 5172-5180.
- Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schröder U, Keller J, Freguia S, Aelterman P, Verstraete W & Rabaey K. (2006) Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ Sci Technol.* 40: 5181-92.
- Logan BE (2009) Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology.* 7: 375-381
- Lovley DR (2008) Extracellular electron transfer: wires, capacitors, iron lungs, and more. *Geobiol.* 6: 225-231.
- Marsili E, Baron DB, Shikhare ID, Coursolle D, Gralnick JA & Bond DR (2008) *Shewanella* secretes flavins that mediate extracellular electron transfer. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 105: 3968-3973.
- Méthé BA, Nelson KE, Eisen JA, Paulsen IT, Nelson W, Heidelberg JF, Wu D, Wu M, Ward N, Beanan MJ, Dodson RJ, Madupu R, Brinkac LM, Daugherty SC, DeBoy RT, Durkin AS, Gwinn M, Kolonay JF, Sullivan SA, Haft DH, Selengut J, Davidsen TM, Zafar N, White O, Tran B, Romero C, Forberger HA, Weidman J, Khouri H, Feldblyum TV, Utterback TR, Van Aken SE, Lovley DR & Fraser CM (2002) Genome of *Geobacter sulfurreducens*: metal reduction in subsurface environments. *Science.* 302: 1967-1969.
- Meyer RL, Larsen LH & Revsbech NP (2002) Microscale biosensor for measurement of volatile fatty acids in anoxic environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 1204-1210.
- Min B & Logan BE (2004) Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrate in flat plate microbial fuel cell. *Environ Sci Technol.* 38: 5809-34.
- Min B, Cheng, S. & Logan BE (2005) Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Res.* 39: 1675-1686.
- Nevin KP & Lovley DR (2002) Mechanisms for Fe(III) oxide reduction in sedimentary environments *Geomicrobiol. J.* 19: 141-159.
- Prasad D, Sivaram TK, Berchmans S & Yegnaraman V. (2006). Microbial fuel cell constructed with a microorganism isolated from sugar industry effluent. *J. Power sources* 160: 991-996
- Rabaey K, Lissens G & Verstraete W (2005) Microbial fuel cells: performances and perspectives. *In: Biofuels for fuel cells.* Lens P, Westermann P, Haberbauer M & Moreno A (eds). IWA Publishing, Alliance House, I., pp. 375-400.
- Rabaey, KG. Lissens SD, Siciliano & Verstraete W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity

Artículos

- at high rate and efficiency. *Biotechnol. Lett.* 25: 1531-1535.
- Reguera G, McCarthy KD, Mehta T, Nicoll JS, Tuominen T & Lovley DR (2005) Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature*. 435: 1098-1101.
- Rittmann BE, Krajmalnik-Brown R & Halden RU (2008) Pre-genomic, genomic and post-genomic study of microbial communities involved in bioenergy. *Nature*. 6: 604-612.
- Risso C, Sun J, Zhuang K, Mahadevan R, DeBoy R, Ismail W, Shrivastava S, Huot H, Kothari S, Daugherty S, Bui O, Schilling CH, Lovley DR & Methé BA (2009) Genome-scale comparison and constraint-based metabolic reconstruction of the facultative anaerobic Fe(III)-reducer *Rhodospirillum rubrum*. *BMC Genomics*. 22: 10: 447.
- Rozendal RA, Hamelers VMH, Rabaey K, Keller J & Buisman JNC (2008) Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trend. Biotechnol.* 26: 450-459.
- Sell D, Krâmer P & Kreysa G (1989) Use of an oxygen gas diffusion cathode and a three-dimensional packed bed anode in a bioelectrochemical fuel cell. *Appl. Microbiol. Technol.* 31: 211-213.
- Torres CI, Marcus AK & Rittmann BE (2007) Kinetics of consumption of fermentation products by anode-respiring bacteria. *Appl. Microbiol. Technol.* 77: 689-697.
- Torres CI, Marcus AK & Rittmann BE (2008) Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. *Biotechnol. Bioeng.* 100: 872-881.
- Von Canstein H, Ogawa J, Shimizu S & Lloyd JR (2007) Secretion of Flavins by *Shewanella* species and their role in extracellular electron transfer. *Appl. Environ. Microbiol.* 74: 615-623.