

Diseño de circuitos para operación de celdas electroquímicas microbianas

Alejandro Yair Manilla Santos¹, Jorge Luis Aguilar Lira¹, Luis A. Balderas Ramírez², Bibiana Cercado^{2,*}

¹Universidad Tecnológica de Tulancingo. Camino a Ahuehuetitla 301, Col. Las Presas, Tulancingo Hidalgo. CP 43642. México.

Correo: alejandro.manillasantos@gmail.com

²Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. Parque Tecnológico Querétaro, Sanfandila. Pedro Escobedo, Querétaro. CP 76703 México. ²bcercado@cideteq.mx

Resumen

El objetivo de la investigación fue realizar el diseño de circuitos electrónicos para ser acoplados a celdas electroquímicas microbianas y substituir el uso de un potencióstato. La metodología consistió en construir un primer circuito emulando la operación de un potencióstato para alimentación de voltaje fijo a la celda; posteriormente, se modificó el circuito inicial para otorgar un voltaje pulsado mediante el uso de un MOSFET (*Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*). Ambos circuitos fueron comparados con la operación de la celda al emplear un potencióstato como control. Los principales resultados muestran que el voltaje pulsado provoca una mayor corriente de salida de la celda (1.03 - 4.37 mA) y, por otro lado, la evolución de voltaje de celda con el crecimiento microbiano favorece la producción de corriente en comparación con un voltaje fijo como ocurre con el uso del potencióstato (0.09 - 0.49 mA). De este trabajo, se concluye que es posible diseñar circuitos que no sólo substituyan el uso de potencióstato, sino que también mejoren la producción de energía en celdas electroquímicas microbianas.

Palabras clave: Circuito electrónico, energías alternativas, sistemas bioelectroquímicos microbianos

Abstract

The objective of the research was to design electronic circuits to be coupled to microbial electrochemical cells and replace the use of a potentiostat. The methodology consisted of constructing a first circuit emulating the operation of a potentiostat for power supply of a fixed voltage to the cell; later, the initial circuit was modified to give a pulsed voltage through the use of a MOSFET (Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor). Both circuits were compared with the operation of the cell using a potentiostat as a control. The main results show that the pulsed voltage gives a higher output current of the cell (1.03 - 4.37 mA), and that the evolution of cell voltage with microbial growth favors the production of current compared to a fixed voltage as it occurs with the use of the potentiostat (0.09 - 0.49 mA). From this work, it is concluded that it is possible to design circuits that not only replace the use of potentiostat, but also improve the production of energy in microbial electrochemical cells.

Keywords: *electronic circuit, alternative energy, microbial bioelectrochemical systems.*

Artículo arbitrado

Recibido:
22 de abril de 2019

aceptado:
22 de agosto de 2019

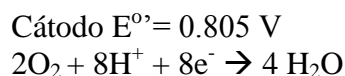
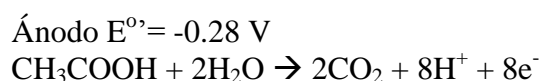
Introducción

El desarrollo de tecnologías para suministrar energías alternativas a las derivadas del petróleo se ha dirigido a la biomasa residual por las ventajas que esta representa. Los desechos agroindustriales y de la industria alimentaria pueden ser utilizados como materia prima de bajo costo; además, contienen materia orgánica susceptible de ser transformada en productos de valor mediante microorganismos.

El concepto descrito anteriormente se aplica en las celdas electroquímicas microbianas. Estas son dispositivos instalados con electrodos puestos en contacto con materia orgánica y microorganismos: la actividad microbiana permite la oxidación de la materia y produce una corriente eléctrica que fluye del ánodo al cátodo (Cercado, 2014; Liu et al. 2010).

La energía que se produce en las celdas electroquímicas microbianas es espontánea, en cuyo caso se considera la operación como celda de combustible de donde se obtiene una corriente eléctrica y agua. Ambos se consideran productos principales mientras sea alimentado un combustible (materia orgánica de desecho) a la celda.

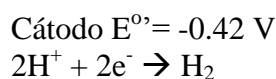
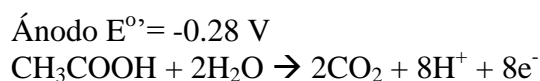
La diferencia de potencial entre las reacciones de semicelda da lugar a un voltaje de celda positivo. Para el caso de acetato como sustrato o combustible modelo, se tiene en cada electrodo:



$$E_{\text{celda}} = 0.805 \text{ V} - (-0.28 \text{ V}) = 1.085 \text{ V}$$

En los casos en que se adiciona energía a la celda mediante una fuente externa, se le denomina celda de electrólisis (CEM). En ella se obtienen, además de una corriente eléctrica, productos de valor como combustibles gaseosos (hidrógeno, metano), ácidos orgánicos (acetato, butirato) y moléculas oxidantes (peróxido de hidrógeno) (Rabaey et al. 2010).

Considerando como ejemplo la producción de hidrógeno, la diferencia de potencial entre los electrodos indica el voltaje de celda teórico requerido.



$$E_{\text{celda}} = -0.28 \text{ V} - (-0.42) = 0.14 \text{ V}$$

Dado que los productos de valor provienen de materia residual de bajo costo, el beneficio económico puede ser alto en las celdas de electrólisis microbianas; sin embargo, la necesidad de adicionar energía de forma externa con el uso de equipos complejos como un potencióstato, reduce la eficiencia energética en este tipo de celdas. Debido a ello, se buscan alternativas para proveer energía a las celdas de electrólisis con el desarrollo de circuitos electrónicos que permitan gestionar el voltaje de celda empleando simplemente una fuente de poder.

El uso de sistemas de gestión de energía para celdas electroquímicas microbianas es poco frecuente debido a que se acopla a una tecnología también en desarrollo como las celdas electroquímicas microbianas. La diversidad de diseños, funciones y desempeños que se han obtenido a partir de las celdas microbianas no permiten establecer una sola estrategia de gestión de energía. Wang et al. (2015) han reportado varias estrategias para aumentar y almacenar la energía, tales como el uso de bombas de potencia, capacitores e inductores por mencionar algunos.

El diseño de circuitos requiere del conocimiento previo de la capacidad de generación de energía en forma de corriente y voltaje de la celda electroquímica microbiana; también, de la función deseada de la misma, ya sea para producción de una corriente eléctrica o para producción de compuestos de valor. En esta investigación, se presenta el diseño de dos circuitos para controlar el voltaje de entrada

de una CEM y su funcionamiento se compara con un control potencioestático a fin de determinar el acoplamiento que ofrezca el mejor desempeño en generación de energía.

Método

Circuitos electrónicos

El circuito electrónico 0.0 estuvo conformado por un microcontrolador 16f887 el cual registraba las variaciones de voltaje que se presentaban en la CEM; además, dicho elemento realizaba mediciones de corriente cada hora y almacenaba los datos tomados de forma temporal mostrándolos en una pantalla LCD. El circuito 0.0 contaba con un regulador de voltaje analógico, con el cual se establecía el voltaje de alimentación de la CEM en un intervalo de variación de 0.2 V a 1.5 V; típicamente pasaba por un amplificador operacional como parte de la etapa de potencia, así como también para alimentar a la celda.

El circuito 1.1 fue diseñado para proporcionar una alimentación pulsada por medio de modulación de ancho de pulso. Dado que el sistema principal funciona a 5 V, este se alimentó con el mismo voltaje con una frecuencia determinada por el microcontrolador instalado (500 Hz). De esa forma, la señal alta fue 5 V y la señal baja 0 V con un ciclo de trabajo del 10% dando en promedio 0.5 V de manera constante a una frecuencia de 500 Hz. En el circuito 1.1, se eliminó el muestreo de voltaje y corriente; adicionalmente, se modificó la etapa de potencia de un amplificador operacional a un MOSFET que cumpliera con la misma función.

Celdas electroquímicas microbianas

Se utilizaron celdas de vidrio tipo H de dos cámaras con 120 mL de líquido en cada cámara. Se utilizó una membrana de intercambio catiónico de 3 cm de diámetro como separador de las cámaras (CMI-7000 Ultrex), un cátodo de malla de acero inoxidable de 1 cm x 2 cm y un ánodo de fieltro de carbón grafito de 2 cm x 2 cm x 1 cm (Rooe, México). El ánodo fue previamente colonizado con bacterias provenientes de lixiviado de composta como se ha descrito

previamente (Cercado et al., 2013). El catolito estuvo compuesto por solución amortiguadora de fosfato de potasio (50 mM, pH 5). El lixiviado de composta tuvo una demanda química de oxígeno de 50 x 250 mg/L y de 250 x 57 mg/L. Las CEMs se alimentaron con acetato de sodio (10 mM) cada tercer día, se mantuvieron a temperatura ambiente y fueron operadas en modo lote.

Técnicas analíticas

Las CEMs se caracterizaron mediante potencial de circuito abierto y cronoamperometría. El anolito se analizó en contenido de materia oxidable mediante el uso del equipo para el método de digestión (Hach 8000).

Resultados y discusión

Se diseñó un circuito electrónico versión 0.0 con un regulador de voltaje analógico, que posteriormente fue substituido por un TRIAC tic106 en su versión 1.0, para controlar el voltaje suministrado a una CEM. Una vez evaluado el desempeño de ambos circuitos se realizaron mejoras para proporcionar un voltaje promedio pulsado mediante un MOSFET buz11; este circuito fue denominado 1.1. Finalmente, el voltaje y corriente de la CEM acoplada a los circuitos, se compararon con un control que consistió en un potencioestado/galvanostato (BioLogic VSP, EC-Lab ver. 10.23) conectado a la CEM.

Diseño de los circuitos electrónicos

El circuito inicial 0.0 se muestra en la Figura 1. Este circuito fue conceptualizado para proporcionar un voltaje fijo de celda que simula la operación de un potencioestado.

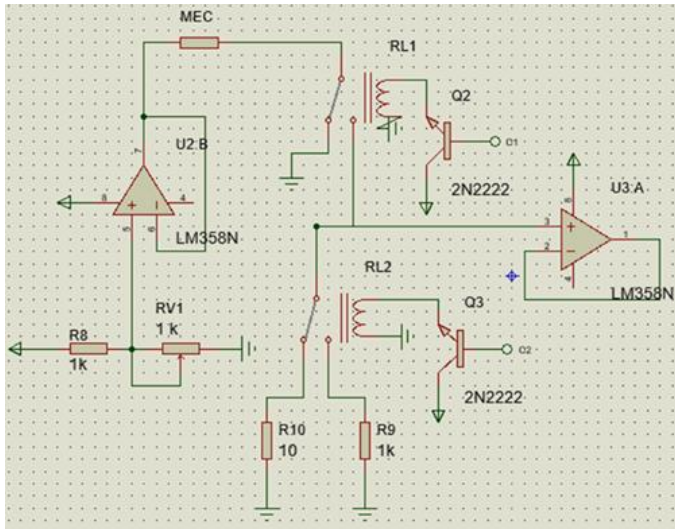


Figura 1. Diagrama de componentes del circuito 0.0. Fuente: elaboración propia.

por un MOSFET buz11, con lo que se conformó el circuito 1.1 que se muestra en la Figura 2.

Se seleccionó un MOSFET buz 11 por encima de transistores y SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) debido a que, aunque no puede suministrar altas corrientes, soporta frecuencias muy elevadas. El MOSFET alcanza un estado de transmisión o de conducción a partir de un voltaje fijo; en este caso, el voltaje de umbral es de 250 mV con un voltaje de drenaje de 50 V. Esta condición de funcionamiento es de mayor utilidad, ya que no demanda corriente del microcontrolador 16f887 y en consecuencia le otorga a todo el circuito una vida útil más prolongada que en caso de utilizar un SCR.

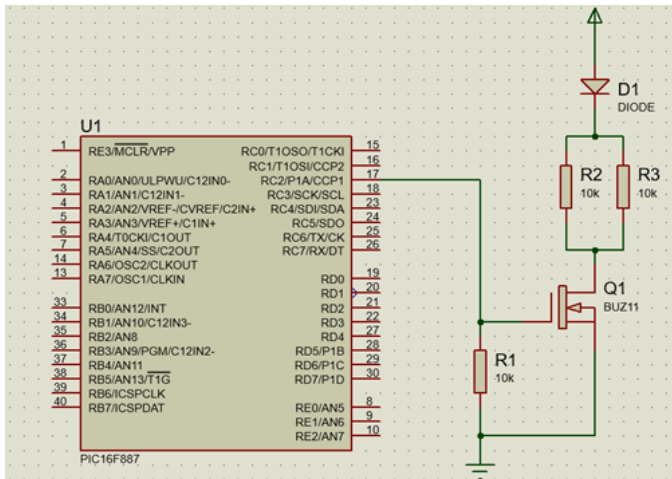


Figura 2. Diagrama de componentes del circuito 1.1. Fuente: elaboración propia.

El circuito 1.1 se evaluó con una resistencia 10 Ω sin mostrar caídas de voltaje significativas y dejando pasar una corriente de 500 mA. El valor de corriente se consideró suficiente para la alimentación de las celdas, las cuales operan con corrientes por debajo de 50 mA (Wang et al., 2013).

La señal de salida típica del circuito 1.1 se muestra en la Figura 3, en donde se observan ciclos compuestos por estado alto (5 V), estado bajo de voltaje (0 V) y voltaje de celda variable.

Comportamiento de voltaje de celda

El voltaje de alimentación a la CEM se mantuvo fijo en 0.5 V con el circuito 0.0; sin embargo, el voltaje acumulado de esta, más el alimentado por el circuito, osciló entre 0.51 V y 0.87 V en los primeros 8 días de operación. De esta observación se deduce que, aunque el circuito 0.0 se calibró para alimentar la celda a 0.5 V, el voltaje registrado aumentó por el crecimiento microbiano (Figura 4).

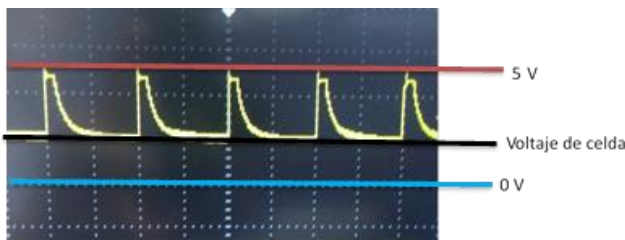


Figura 3. Señal de salida de una CEM acoplada al circuito 1.1. Fuente: elaboración propia.

El circuito 0.0 fue modificado para integrar un TRIAC (*Triode For Alternating Current*) tic106 (circuito 1.0), el cual originó una pérdida de voltaje para la etapa de potencia; por lo cual fue substituido

Debido al fenómeno anteriormente descrito, se realizó una corrección de voltaje el día 8, en el que se ajustó el valor de alimentación a 0.2 V mediante el trimpot parte del circuito. El procedimiento de ajuste ocasionó una caída de voltaje de celda durante 2.5 días; pero posteriormente, este comenzó a incrementar nuevamente, por lo que se prefirió reestablecer el voltaje de alimentación en 0.5 V a

partir del día 12 y dejar que el voltaje registrado evolucionara bajo el factor biológico.

El circuito 1.1 se diseñó para fijar 0.5 V en la CEM; no obstante, el voltaje registrado llegó a 3.7 V y se mantuvo constante con pequeñas fluctuaciones durante 4 días. El acoplamiento de la CEM con el circuito 1.1 generó un voltaje de celda de 3.8 V en los primeros 4 días; después, fue fluctuante, pero en aumento. Finalmente alcanzó un máximo de 4.2 V en 15 días (Figura 4).

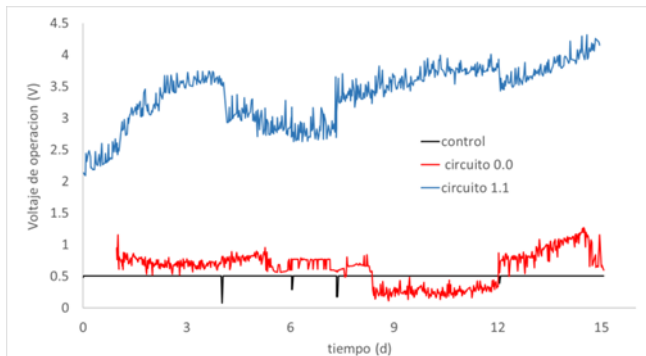


Figura 4 Evolución de voltaje de las CEM acopladas al circuito 0.0, 1.1, y al potenciostato como control. Fuente: elaboración propia.

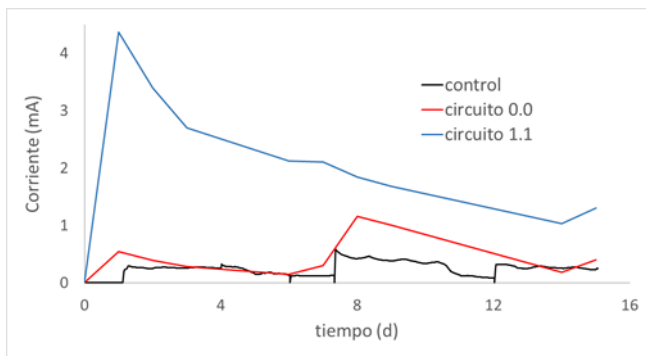


Figura 5. Cronoamperogramas de las CEM conectadas al circuito 0.0, 1.1, y al potenciostato como control. Fuente: elaboración propia.

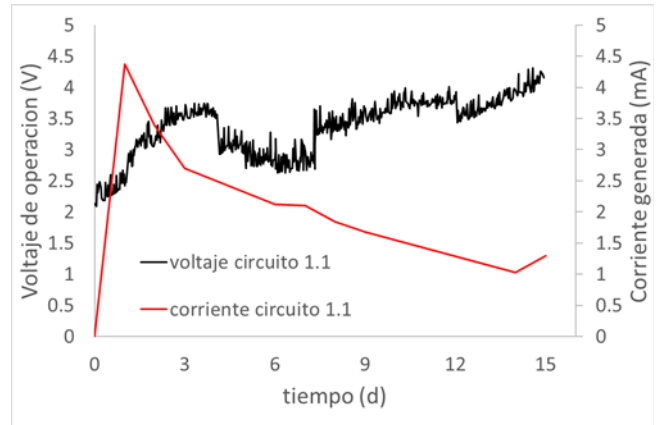


Figura 6. Evolución de voltaje y corriente en la CEM acoplada al circuito 1.1. Fuente: elaboración propia.

El incremento de voltaje en todo el periodo de operación de la CEM con el empleo del circuito 1.1 fue de 2.1 V. Es necesario notar que el aumento de voltaje fue ocasionado también por tres adiciones de acetato que se realizaron a los 6, 8 y 12 días de operación al igual que en las otras CEM como se esperaría, dadas las reacciones de semicelda para oxidación del sustrato. El incremento constante de voltaje de esta CEM resultó en una mayor actividad en la producción de hidrógeno. Esta se observó en la formación de burbujas de gas sobre la malla de acero que conformaba el cátodo.

Finalmente, se utilizó un potenciostato para fijar el voltaje de celda en 0.5 V como control del funcionamiento de los circuitos desarrollados. La Figura 4 muestra el potencial del ánodo conectado como electrodo de trabajo que fue similar a mediciones puntuales de voltaje de celda durante todo el periodo de operación.

Comportamiento de la corriente eléctrica

La corriente eléctrica que circulaba por la CEM conectada al circuito 0.0 varió entre 0.18 mA y 1.16 mA como se señala en la Figura 5. Al calcular el área bajo la curva I vs t , se obtuvo una corriente diaria de 9.36 mAd equivalente a una potencia diaria de 4.64 mW.

La corriente que circulaba por la CEM conectada al circuito 1.1 fue decreciente en el tiempo. Este comportamiento estuvo acorde con el voltaje de celda en aumento como se indica en la Figura 6.

La relación inversa entre voltaje de celda y corriente observada para la CEM con el circuito 1.1 se explica por la diferencia de voltaje que se encuentra entre la señal alta de alimentación (Figura 3) y la celda. Dicha diferencia iba siendo menor, por lo cual la corriente que circulaba también disminuía con lo que se provocó un comportamiento parecido a una batería o una pila cuando son cargadas.

Para este acoplamiento, se obtuvo una corriente diaria de 29 mAd. Al considerar este dato y un voltaje de alimentación pulsado promedio de 0.5 V, se logró obtener un total de energía de 16 mW al día. Finalmente, la corriente que circulaba en la CEM conectada al potencióstato varió en torno a 0.3 mA, con lo que se reflejó un pico de 0.6 mA y un mínimo de 0.08 mA como se muestra en la Figura 5. En la CEM con control potencióstático, la corriente diaria fue de 2.881 mAd correspondiente a una potencia de 1.4 mW al día.

Un análisis comparativo del circuito 0.0, 1.1. y del uso de potencióstato como control indica que el circuito 1.1 ofrece un mejor funcionamiento en términos de voltaje y corriente de salida de la CEM (Tabla 1).

Versión de circuito	Voltaje de alimentación (V)	Voltaje registrado (V)	Intervalo de corriente registrada (mA)	Corriente diaria registrada (mAd)
0.0	0.5, 0.2, 0.5	0.18 - 1.2	0.18 - 1.16	9.4
1.1	0.5 pulsado	2.1 - 4.2	1.03 - 4.37	29
Potencióstato	0.5 fijo	0.5	0.09 - 0.49	2.9

Tabla 1. Comparación del funcionamiento de los circuitos diseñados y el control potencióstático. Fuente: elaboración propia.

El potencióstato permite un voltaje de alimentación estable, constante y mantiene fijo el voltaje de salida de la CEM gracias a su complejo funcionamiento. Este es en general desconocido por el usuario y difícilmente es modificado para cumplir requerimientos específicos.

Por otra parte, el circuito 0.0 fue diseñado para emular el control realizado con el potencióstato, en el que se aplicó un voltaje estable y en forma continua de 0.5 V; pero, se permitió la fluctuación del voltaje de la CEM, la cual fue variando en el tiempo. Ya que no se restringe el voltaje de celda, existe una mayor cantidad de corriente que circulaba por la misma. Debido a las diferencias en operación, la corriente con el circuito 0.0 fue aproximadamente 2 veces mayor que la corriente empleando el potencióstato.

En cuanto al circuito 1.1, este se diseñó para operar mediante una modulación de ancho de pulso que pasa de 0 V a 5 V con una frecuencia de 500 Hz y en un ciclo de trabajo del 10%, con lo que se obtuvo como promedio 0.5 V. Dichas características permitieron una corriente 9 y 4 veces mayor que el control y que el circuito 0.0 respectivamente.

Las notables ventajas del circuito 1.1 se deben a la diferencia de voltajes de alimentación, aunque, en promedio, el circuito proporciona un voltaje de 0.5 V, se está alimentando en pulsos con voltajes altos (5 V) por 200 μ s y voltajes bajos (0 V) por 1.8 ms. Los pulsos provocan que exista una diferencia de voltaje mayor entre la celda y la fase alta de alimentación. Aún cuando dicha forma de operación ocurre en forma alternada y por cortos periodos, se origina una mayor corriente circulando por el sistema.

Conclusiones

El diseño de circuitos electrónicos para gestionar la alimentación de celdas de electrólisis microbianas es un tema de investigación que requiere mayor impulso a fin de substituir equipos complejos y costosos como puede ser un potencióstato. El diseño de dos circuitos, el primero que simula la operación de un potencióstato al mantener un voltaje de alimentación fijo, y el segundo, en el que se aplica un voltaje pulsado a la celda, mostraron que permitir la evolución del voltaje de celda con el crecimiento microbiano resulta en una mayor corriente eléctrica circulando por el sistema. Debido a esa forma de operación, la energía total recuperada fue mayor, lo

cual implica que se le otorga a la celda más capacidad para formar productos de valor. En un trabajo futuro se espera utilizar el circuito 1.1 para la producción de biocombustibles gaseosos.

Agradecimientos

La investigación recibe apoyo financiero del Clúster Biocombustibles Gaseosos Proyecto 247006 del Fondo CONACYT-SENER-FSE.

Referencias

Cercado, B. (2014). Sistemas bioelectroquímicos microbianos para remoción de contaminación, generación de energía limpia y otros usos prometedores. *Nthe*, 8, pp. 10-15. <http://nthe.concyteq.edu.mx/pdf/nthe8.pdf>

Liu, H. et al. (2010). Microbial electrolysis: novel technology for hydrogen production from biomass. *Biofuels*, 1(1), pp. 129-142.

Rabaey, K., Rozendal R. A. (2010). Microbial electrosynthesis-revisiting the electrical route for microbial production. *Nature Reviews*, 8, pp. 706-716.

Wang, H. et al. (2015). Practical Energy Harvesting for Microbial Fuel Cells: A Review. *Environmental Science & Technology*, 49(6), pp. 3267-3277.

Cercado, B. et al. (2013). Garden compost inoculum leads to microbial bioanodes with potential-independent characteristics. *Bioresource Technology*, 134, pp. 276-284.

Wang, H. M., & Ren, Z. Y. J. (2013). A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1796-1807.