

Acoplamiento de celdas microbiológicas de combustible en humedales artificiales para depuración de aguas residuales

Autores: L. Horcajada, F.J. Fernández, J. Villaseñor^(*), M.A. Rodrigo, P. Cañizares y A. de Lucas.

Grupo red META: Universidad de Castilla La Mancha, Grupo TEQUIMA-Laboratorio de Ingeniería Electroquímica y Ambiental.

(*) jose.villasenor@uclm.es

Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario s/n. 13005 Ciudad Real. España.

Resumen

El objetivo de esta investigación es estudiar el posible funcionamiento del denominado "electrohmedal", es decir, un humedal artificial de flujo sub-superficial al que se acopla una celda microbiológica de combustible, a fin de llevar a cabo la depuración de un agua residual simultáneamente a la obtención de energía eléctrica debido a la oxidación de la contaminación orgánica. Se diseñó y construyó un humedal piloto con electrodos de grafito en su parte inferior (anódica) y superior (catódica) y se ha trabajado en continuo desde inicios de 2012. Se ha observado que el sistema depura el agua con las eficacias habituales para este tipo de humedales, y además es capaz de generar energía eléctrica. Cuando el humedal recibía una DQO excesivamente alta el compartimento catódico entraba en condiciones anaerobias y dejaba de funcionar la celda. Por otro lado, el cambio de flujo vertical a horizontal en dicho compartimento no generó mejora en el rendimiento eléctrico. Los niveles de potencia eléctrica generados se encuentran dentro de los habituales en otros tipos de sistemas naturales similares que permiten el acoplamiento de celdas de combustible, como las celdas fotosintéticas o las sedimentarias.

Abstract

The aim of this work is to check whether a subsurface constructed wetland for wastewater treatment could also work simultaneously as a microbial fuel cell in order to harvest electrical energy from the organic pollution. A pilot scale subsurface constructed wetland was designed and constructed including graphite electrodes in its lower (anodic) and upper (cathodic) sections. It was operated under stationary conditions since the beginning of 2012. The results showed that, besides the expected high COD removal efficiency, it also produced electrical current between the electrodes. Under high wastewater COD concentrations, the cathodic section changed to anaerobic conditions and the cell stopped working. Also, the type of flow in the cathodic section (horizontal flow vs. vertical flow) did not affect the cell performance. The power density values obtained in this system were very similar to the ones obtained in other similar natural systems with microbial fuel cell coupling, such as sedimentary or photosynthetic fuel cells.

1. Introducción

En los últimos años está cobrando importancia el tratamiento bio-electroquímico de aguas residuales, orientado a cumplir un doble objetivo: eliminar contaminantes y valorizarlos energéticamente. Su funcionamiento se basa en la existencia de microorganismos que son capaces de oxidar la materia orgánica del agua residual y ceder electrones a un ánodo, de forma que se establece una corriente eléctrica hasta un cátodo en el que actúa un aceptor de electrones, generalmente O_2 . Para ello es necesaria la existencia de un gradiente de potencial eléctrico entre las zonas del ánodo y del cátodo. El tratamiento bio-electroquímico presenta dos variantes: las celdas microbiológicas electrolíticas (MEC) y las celdas microbiológicas de combustible (MFC). El segundo caso es el que presenta un balance energético favorable que permite la obtención de energía a partir de la materia orgánica del agua residual (Rozendal et al., 2008). A partir de este principio se han desarrollado muchas investigaciones que combinan el tratamiento biológico del agua residual con la

generación de energía eléctrica. En todos los casos se necesita un reactor combinado aerobio/anaerobio en el que se llevan a cabo los procesos convencionales de eliminación de C y nutrientes, y además entre ellos se genera una diferencia de potenciales redox.

El grupo de investigación E3L-TEQUIMA de la UCLM ha trabajado tradicionalmente en temas relacionados tanto con los tratamientos biológicos, como con los tratamientos electroquímicos de aguas residuales. Se dispone de experiencia, entre otros temas, en el uso de humedales artificiales de flujo sub-superficial (SSFCW), y en el uso de MFC. Esta experiencia permitió identificar la similitud que existía entre las condiciones ambientales de una MFC y las de un humedal sub-superficial cuando ambos reciben una corriente de agua residual con contaminantes orgánicos biodegradables. Los SSFCW presentan un perfil vertical de potenciales redox que permite el desarrollo de diversos mecanismos microbiológicos aerobios, anóxicos y anaerobios (García et al., 2010). Este perfil se establece básicamente entre la parte superficial y el fondo, o bien entre aquellas partes que pudieran recibir el oxígeno suministrado por las plantas del humedal, y las que no lo reciben. Por todo ello, y teniendo en cuenta que no existían hasta ese momento referencias bibliográficas previas, se consideró interesante estudiar si un SSFCW podría actuar simultáneamente como una MFC. En 2011 se inició el diseño y construcción de un prototipo SSFCW piloto y a partir de 2012 se ha mantenido en funcionamiento continuo tratando agua residual urbana sintética. Desde entonces se ha trabajado ininterrumpidamente estudiándose el efecto de diferentes variables: la carga orgánica recibida por el humedal, el tipo de flujo en la parte superior (flujo horizontal o vertical) o la salinidad del agua residual, tratándose siempre de variables que pudieran influir en el funcionamiento tanto de un humedal subsuperficial como de una MFC, a fin de optimizar la depuración del agua y la generación de energía. En esta comunicación se ofrece un resumen de los resultados obtenidos hasta el momento.

2. Materiales y métodos

Se utilizó un SSF-CW de flujo horizontal a escala piloto, de 0.5 m de profundidad y se usaron plantas de la especie *Phragmites Australis*. Durante su construcción se acoplaron los elementos necesarios de una MFC (figura 1).

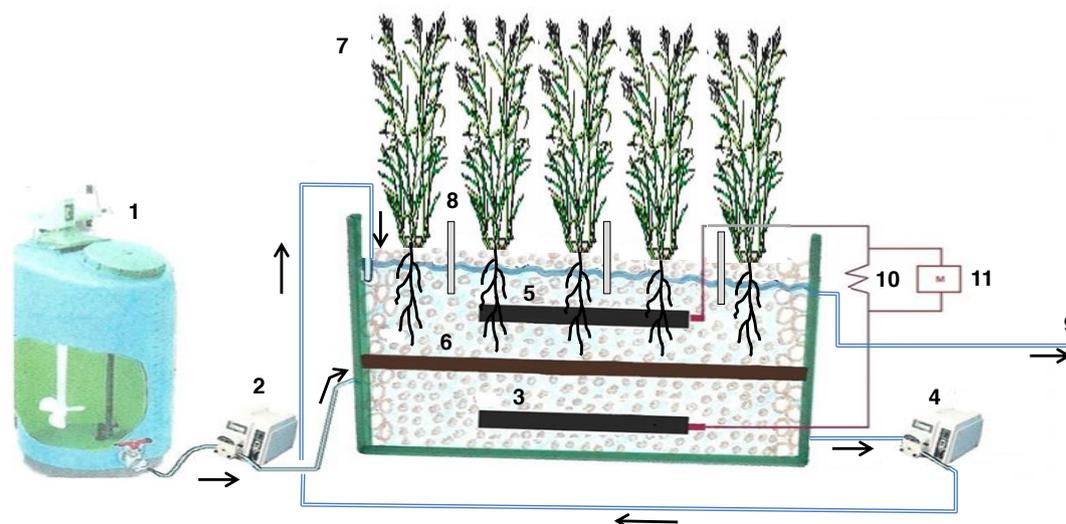


Figura 1. (1) Depósito de agua residual; (2) Bomba peristáltica; (3) Anodo; (4) Bomba peristáltica; (5) Cátodo; (6) Capa de bentonita; (7) Plantas; (8) Puntos de muestreo; (9) Agua tratada; (10) Resistencia; (11) Medidor de voltaje. (Figura tomada de Villaseñor y col, 2013).

Se utilizaron dos electrodos de grafito de 0.7 m x 0.15 m, una resistencia de 120 Ω y una capa de 2 cm de bentonita para separar la zona anódica (inferior) y catódica (superior), quedando las raíces en la zona superior. Se usaron bombas peristálticas para el flujo del agua a través de ambas zonas, con un tiempo de residencia de 3.2 d. Se usó agua residual sintética cuyos componentes orgánicos eran glucosa y acetato sódico. El humedal se situó en un invernadero construido en el Instituto de Tecnología Química y Medioambiental de la UCLM en Ciudad Real. Se inoculó con microorganismos de una MFC de laboratorio y se operó en continuo. Los experimentos se realizaron siempre en el periodo febrero-octubre, considerando al menos dos meses de operación estacionaria para cada uno de los valores de las variables en estudio. Mas detalles sobre el procedimiento experimental están disponibles en la bibliografía (Villaseñor et al., 2013).

3. Resultados y discusión

La figura 2 muestra la evolución de la DQO en la entrada y salida del humedal y el voltaje generado durante el periodo febrero-octubre de 2012. El humedal comenzó a trabajar recibiendo una DQO de 230 ppm y tras un periodo de aclimatación se llegó a obtener un estado estacionario en el que la eliminación de la contaminación orgánica era prácticamente total y se generó un voltaje medio entre electrodos de 240 mV. Posteriormente se aumentó la DQO hasta valores de 550 ppm, observándose un aumento de voltaje hasta aproximadamente 700 mV aunque con muchas oscilaciones. El efecto de la intensidad de la luz solar a lo largo de cada día tuvo una clara influencia sobre los resultados (Villaseñor et al., 2013). Finalmente, con una DQO de 1100 ppm se produjo una caída brusca del voltaje. Tras el análisis del potencial redox y la concentración de oxígeno disuelto en el compartimento catódico superior se comprobó que el sistema era capaz de oxidar completamente la materia orgánica en la zona anódica durante los dos primeros periodos, pero en el caso del tercer periodo la DQO resultó ser excesiva y parte de la contaminación orgánica pasó a la zona superior. Esto generó la eliminación del oxígeno y el descenso brusco del potencial redox en dicha zona y los niveles de voltaje disminuyeron bruscamente.

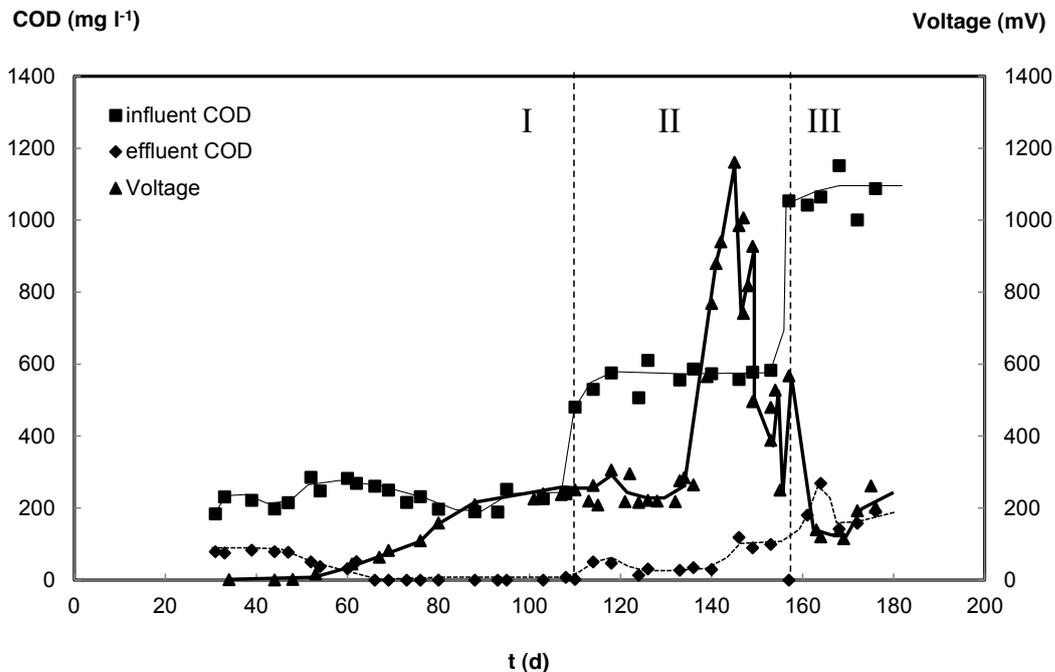


Figura 2. Eliminación de DQO y generación de voltaje durante tres periodos consecutivos de operación con cargas orgánicas crecientes. (Figura tomada de Villaseñor y col, 2013).

La tabla 1 muestra los resultados de eficacia coulombica, densidad de potencia y densidad de corriente obtenidos durante el segundo periodo (DQO=560 ppm). Estos resultados son muy similares a los que ofrecen otras MFC basadas en sistema naturales, como las MFC sedimentarias, las fotosintéticas o las basadas en plantas.

Tabla 1. Parámetros indicativos del funcionamiento del SSF-CW - MFC.

Parámetro	Voltaje promedio (700 mV)	Voltaje máximo (1161 mV)
Eficacia coulombica (%)	0.27	0.45
Densidad de potencia (mW m ⁻²)	15.6	43.0
Densidad de corriente (mA m ⁻²)	22.3	37.1

En un segundo periodo experimental (febrero-octubre 2013) se mantuvo nuevamente una DQO de entrada de 230 ppm y se modificó el modelo de flujo en la parte superior, pasando a ser flujo vertical. Con esto se intentó estudiar el efecto que el cambio de flujo podría provocar en las condiciones de operación de la zona catódica y, como consecuencia, en la generación de electricidad. Los resultados indicaron que, bajo un flujo vertical, aumentaron notablemente los valores de concentración de oxígeno disuelto y de potencial redox en dicha zona. Sin embargo, esto no generó los resultados esperados ya que el voltaje obtenido fue muy similar al obtenido utilizando flujo horizontal. Se considera que este resultado se debe a que la mayor capacidad de oxigenación del humedal acabó afectando también a la zona inferior. Tanto en condiciones de flujo horizontal como vertical, el SSFCW-MFC se caracterizó desde el punto de vista electroquímico, realizando para ello curvas de polarización, observándose cuales eran los fenómenos que provocaban las mayores pérdidas de voltaje.

En la actualidad se está estudiando el efecto de la conductividad eléctrica del agua residual sobre la generación de voltaje. Para ello se está alimentando agua residual sintética con concentraciones crecientes de NaCl.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en estos dos años muestran que el “electrohumedal” funciona, las variables han tenido el efecto esperado, aunque su rendimiento en la generación de energía eléctrica es aún muy bajo y su comportamiento es muy similar a otras modalidades de MFC basadas en sistemas naturales como son las celdas sedimentarias o las fotosintéticas.

5. Bibliografía

1. García, J., Rousseau, D.P.L., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V. & Bayona, J.M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 40, 561-661.
2. Rozendal, R.A., Hamelers, H.V.M., Rabaey, K., Keller, J. & Buisman, C.J.N. (2008). Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*. 26, 450-459.
3. Villaseñor, J., Capilla, P., Rodrigo, M.A., Cañizares, P. & Fernández, F.J. (2013). Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland-Microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Research*. 47, 6731-6738.