

Producción de energía y depuración simultánea de aguas mediante Pilas de Combustible Microbianas. Aplicación a las aguas del sureste español.

A. Larrosa, A. Ginestá, L.J. Lozano, D. Juan, S. Sánchez, F.J. Hernández, A. Pérez, C. Godínez
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Politécnica de Cartagena
C/ Dr. Fleming sn 30202 Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968 326408 Fax: 968 326561
E-mail: carlos.godinez@upct.es

Resumen. En el presente trabajo se evalúa el efecto de la temperatura operacional en el rendimiento de pilas de combustible microbianas (MFCs) de dos cámaras. Este rendimiento se evalúa tanto desde el punto de vista de la producción de energía como de la depuración simultánea de las aguas residuales empleadas. De este estudio se puede concluir que la temperatura tiene un efecto positivo tanto en la producción de energía como en la eliminación de DQO de las aguas residuales. Además, las MFCs empleadas son capaces de convertir la biomasa significativamente por debajo de los 20°C y con bajas concentraciones de sustrato, lo que supone una ventaja competitiva frente a los digestores anaerobios convencionalmente empleados en la depuración de aguas residuales.

1. Introducción

Una pila de combustible microbiana (MFC, Microbial Fuel Cell) es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica. Esto es posible cuando bajo condiciones adecuadas, determinadas bacterias electroactivas pasan los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo en lugar de a un aceptor de electrones (como oxígeno o nitrato tal y como ocurre en los procesos de depuración naturales). Esta tecnología hace posible la producción de una energía “verde” mediante la explotación de la biomasa contenida en las aguas residuales doméstica e industrial a la vez que se consigue la depuración de las mismas [1-3].

El potencial de las MFCs es enorme dado que esta novedosa tecnología aporta importantes ventajas funcionales y operativas sobre las tecnologías actualmente utilizadas para la generación de energía y para la depuración de aguas a partir de biomasa:

- La conversión de energía desde sustrato a electricidad es directa, permitiendo altas eficiencias
- Las MFCs operan eficientemente a temperatura ambiente, e incluso a muy bajas temperaturas distinguiéndose de todos los demás procesos bioenergéticos actuales.
- Una MFC no requiere tratamiento de gases debido a que los gases de escape están enriquecidos en CO₂ (de origen no fósil) y no tienen valor energético residual
- Las MFCs no tienen partes móviles y por tanto no necesitan aporte de energía siempre que el cátodo sea aireado pasivamente [2]
- Las MFCs tienen una amplia aplicación potencial en localizaciones donde se carece de infraestructura eléctrica, así como para ampliar la diversidad de

combustibles que utilizamos para satisfacer nuestra demanda energética

- Comparativamente con otras tecnologías de depuración de aguas tradicionales (digestión anaerobia), las MFCs generan menor cantidad de fangos con el consiguiente ahorro en los costes de deshidratación que tienen estos materiales

Sin embargo, hasta ahora las MFCs han generado niveles de potencia y eficiencias moderadas, por lo que se requiere un conocimiento más profundo de esta tecnología para su implementación práctica. El hecho de que en esta tecnología confluyan procesos electroquímicos y microbiológicos hace que la temperatura sea un parámetro de estudio de especial importancia [4]. Por ello, el objetivo de este trabajo es el estudio de la influencia de la temperatura (4 a 35°C) sobre el rendimiento de una batería de cuatro MFCs de doble cámara. El rendimiento será evaluado tanto desde el punto de vista de la capacidad de depuración de aguas residuales (eliminación de DQO) como de la capacidad de generación de energía (voltaje, potencia, y eficiencia coulombimétrica)[5].

2. Materiales y métodos

El agua residual empleada en el trabajo procede de la depuradora municipal de aguas residuales Murcia-Este (Murcia). El contenido en DQO deseado en cada ensayo se ajustó mezclando ésta agua con la procedente de una industria de biofuel local.

El tipo de MFC utilizada fue en forma de “H” que consiste en dos cámaras, la anódica y la catódica unidas por un tubo que contiene la membrana de intercambio protónico. En la cámara catódica se colocó el agua residual y en la anódica una disolución de tampón fosfato (pH=7). El ánodo utilizado en estos experimentos fue un trozo de tela de carbón de

2 cm de ancho por 3 cm de alto y el cátodo consistió en una malla de titanio con un recubrimiento de platino de las mismas dimensiones. La membrana utilizada en este trabajo es Nafion[®] 115 de 3,5 cm de diámetro con un espesor de 0,127 mm.

Cada experimento llevado a cabo contó con cuatro pilas de dos cámaras en serie (1a), 2 dos controles con tela de carbón (dummies) (1b) y 2 dos controles sin ella (1c). En los experimentos bajo carga eléctrica, los ánodos y cátodos se conectaron en circuito cerrado con resistores de 1 kΩ.

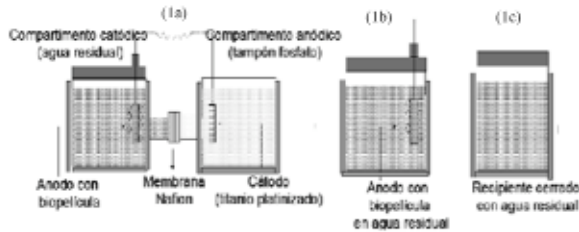


Figura 1. Dispositivo experimental.

Se monitorizó el rendimiento de las pilas durante 7 días a través de medidas continuas de voltaje (sistema de adquisición de datos de National Instruments denominado Measurements & Automation Explorer) y análisis diario de DQO (método fotométrico- *Test en cubetas de DQO* de MERCK). A partir del voltaje (E_{pila}) se determinaron la intensidad, la potencia y la eficiencia coulombica de las pilas.

La potencia normalizada para el volumen del reactor se obtiene según la siguiente expresión:

$$P_v = \frac{F^2 \rho^2}{VR_{ext}} \quad [1]$$

donde P_v es la potencia volumétrica (W/m^3), y V es el volumen total del reactor.

La eficiencia coulombica, ϵC , se define como la relación entre el número de coulombios realmente transferidos al ánodo desde el sustrato y el número máximo posible de coulombios transferidos si todo el sustrato fuera capaz de producir corriente, es decir:

$$Y_Q = \frac{\text{coulombios totales producidos}}{\text{coulombios totales teóricos producibles}} \times 100$$

El total de coulombios obtenidos se determina integrando la corriente frente al tiempo, con el fin de poder obtener la eficiencia coulombica de una MFC alimentada en modo por lotes, C_b , evaluada durante un período de tiempo t_b , que se calcula como:

$$Y_Q = \frac{M_m \int i(t) dt}{F \cdot \Delta DQO \cdot b \cdot V} \times 100$$

Donde: M_m es la masa molecular de oxígeno (32 g/mol); $i(t)$ es la intensidad de corriente ($A = C/s$); F es la constante de Faraday (96485 C/mol de e^-), ΔDQO es la variación de DQO durante el tiempo transcurrido t_b ($DQO_{inicial} - DQO_t$); b son los moles de electrones producidos por mol de oxígeno ($b=4$) y V es el volumen de líquido en la cámara anódica (0,25 l). La integral del numerador, que equivale a la carga acumulada, se calcula por el método de los trapecios.

3. Resultados y discusión

3.1. DQO

La Figura 2 muestra el porcentaje de eliminación de DQO en la media de las 4 pilas para cada una de las temperaturas de este estudio.

Se aprecian dos tendencias diferenciadas. Una tendencia a baja temperatura (4°C y 8°C) donde a las primeras 48 h, la velocidad de eliminación de DQO es lenta, para acelerarse después y alcanzar unos valores finales de en torno al 60 %. La otra tendencia observada es a altas temperaturas (de 30 a 35°C), donde la eliminación de DQO ya es bastante apreciable desde el primer día (un 35% a las 24 h) y a continuación crecer más lentamente hasta estabilizarse en unos valores finales próximos al 75%. Estas tendencias han sido las esperadas, ya que la temperatura favorece cinéticamente tanto los procesos electroquímicos como los microbianos, que son las reacciones que tienen lugar en la pila. También se observa un conjunto intermedio de temperaturas (de 15 a 25°C) en donde el comportamiento es, al principio, más parecido al de las pilas a baja temperatura, para luego crecer rápidamente y alcanzar valores semejantes a los de alta temperatura.

3.2. Voltaje

Observando la Figura 3, puede realizarse el análisis comparativo del comportamiento del voltaje generado por las pilas en circuito cerrado (1kΩ) en base a dos parámetros: el voltaje máximo alcanzado y el tiempo necesario para ello. Se aprecia cómo a 35°C, la temperatura más alta estudiada, se obtiene el valor máximo, como cabía esperar (en torno a 120 mV) si se tiene en cuenta la ecuación de Tafel. Este valor máximo disminuye a temperaturas inferiores, siendo de 50 mV entre 25 y 30°C, 35 mV a 20°C, e inferior a 6 mV para las temperaturas inferiores a 15°C. Con estos valores se deduce que un aumento de 10°C, al pasar de 25 a 35°C, se traduce en un incremento del voltaje al triple. Por último, en cuanto al tiempo necesario para alcanzar el voltaje máximo, es de 24 h a 35°C, siendo cada vez mayor a medida que se desciende en temperatura.

3.2. Potencia

En este caso, al igual que ocurre con el voltaje, la máxima potencia generada ($\approx 50 \text{ mW/m}^3$) se alcanza a la temperatura mayor, así como el tiempo mínimo en conseguirla (Figura 4). De la misma forma, a medida que disminuye la temperatura, la potencia máxima generada es menor, pero el máximo tarda más tiempo en conseguirse. Además, la mínima temperatura a la que es apreciable la generación de potencia en a 20°C . A partir de aquí, se pueden interpretar las curvas como ruido del sistema de adquisición de datos.

3.4. Eficiencia coulombica

En cuanto a la influencia de la temperatura sobre la eficiencia coulombica, en la Figura 5 se aprecia que la eficiencia coulombica aumenta para cada temperatura, a pesar de que la eliminación de DQO también lo hace. Esto indica que la producción de corriente se ve aún más favorecida con la temperatura que la eliminación de DQO.

4. Conclusiones

Desde el punto de vista de depuración de aguas residuales (centrado en eliminación de DQO) la temperatura afecta positivamente. La DQO se elimina más rápidamente cuanto mayor es la temperatura. Comparando las MFCs con los controles, a bajas temperaturas la eliminación de DQO es mejor en las primeras, por lo que, si se debe trabajar a bajas temperaturas, parecen más adecuadas éstas que la digestión anaerobia convencional. A altas temperaturas, sin embargo, se observaron fenómenos de inhibición en las pilas, que no se dan en los controles.

Desde el punto de vista energético, cuanto más alta es la temperatura empleada, mayor será la cantidad de electrones que llegarán al ánodo, con lo que se incrementará también la densidad de corriente, la diferencia de potencial producida y la potencia generada. Además, también lo es la eficiencia coulombica, lo que prueba que la producción de electricidad se ve más favorecida con la temperatura que la eliminación de DQO.

Lo expuesto anteriormente nos lleva a pensar que no existe una temperatura óptima de trabajo en una MFC, sino que la más alta posible, en el intervalo de temperaturas estudiado, es la que más beneficia la producción de energía. Sin embargo, no se puede decir que no deba trabajarse a temperaturas bajas. Entre las características más prometedoras de esta nueva tecnología está la mejora de la cinética de eliminación de materia orgánica a baja temperatura.

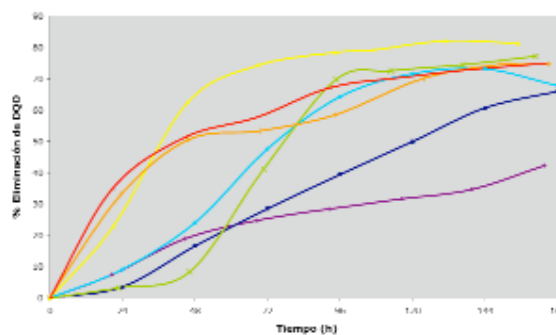


Figura 2. Porcentaje de eliminación de DQO con respecto al tiempo en las pilas para cada temperatura estudiada

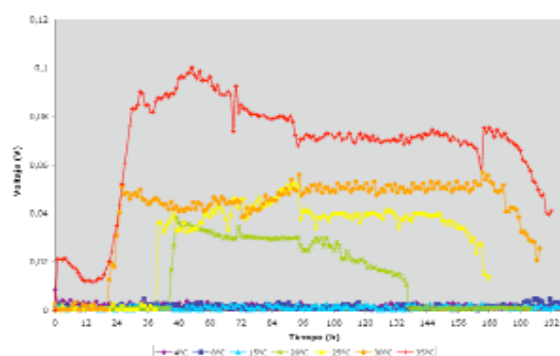


Figura 3. Voltaje con respecto al tiempo en las pilas para cada temperatura estudiada

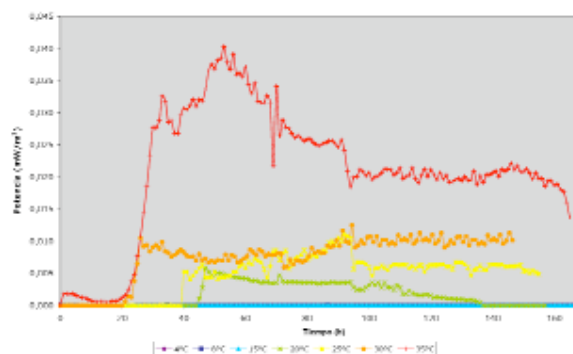


Figura 4. Potencia con respecto al tiempo en las pilas para cada temperatura estudiada

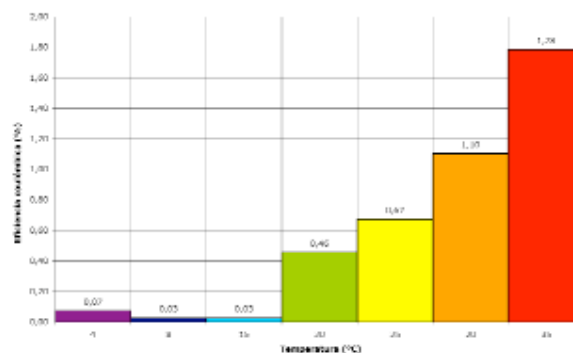


Figura 5. Porcentaje de eficiencia coulombica al final del experimento (168 horas) para cada temperatura estudiada.

Así, en lugares de clima frío la depuración por MFCs podría sustituir o complementar la digestión anaerobia, ahorrando de esta manera la energía necesaria para alcanzar temperaturas óptimas en esta última.

4. Perspectivas futuras

Los resultados obtenidos son enormemente alentadores pero aún así se requiere un mayor conocimiento de la tecnología para su implementación práctica, especialmente en la minimización de costes y en la creación de arquitecturas inherentemente escalables. Es en esta línea en la que el grupo INQUICA de la Universidad Politécnica de Cartagena, liderado por Carlos Godínez, viene trabajando los últimos años. El grupo ha logrado importantes avances en el desarrollo de cátodos elaborados con materiales de bajo coste suficientemente robustos. En la actualidad, el grupo está desarrollando nuevas membranas de intercambio iónico basadas en líquidos iónicos. Recientes trabajos indican que los líquidos iónicos pueden operar como excepcionales electrolitos conductores de protones [6] y sugieren que podrían ser incorporados en los futuros diseños de pilas de combustible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (ENE2006-09395) y cuenta con la colaboración de Aquagest y Emuasa.

Referencias

- [1] B.E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguía, P. Aelterman, W. Verstraete, K. Rabaey, "Microbial fuel cells: methodology and technology". *Environmental Science and Technology*, pp 5181-5192, vol. 40 (2006).
- [2] H. Liu, R. Ramnarayanan, B.E. Logan, "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell". *Environmental Science and Technology*, pp 2281-2285, vol. 38 (2004).
- [3] K. Rabaey, P. Clauwaert, P. Aelterman, W. Verstraete, "Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation". *Environmental Science and Technology*. pp. 8077-8082, vol. 39 (2005).
- [4] Y. Han, S. Sung, R. Dague, "Temperature-phased anaerobic digestion of wastewaters sludges". *Water Science and technology*, pp. 367-374, vol. 36 (1997).
- [5] B.K. Ahring, M. Sandberg, I. Angelidaki, "Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors". *Applied Microbiological Biotechnology*, pp 559-565, vol. 43 (1995)
- [6] A. Fericola, S. Panero, B. Scrosati, "Proton-conducting membranes based on protic ionic liquids". *Journal of Power Sources*, pp. 591-595, vol. 178 (2008).