

Estudio de viabilidad económica de la implantación de bioceldas en una planta de tratamiento de aguas residuales

Justo Lobato^{a*}, P. Cañizares^a, M.A. Rodrigo^a, Laura Horcajada^a, F.J. Fernández^b, Araceli González del Campo^b y Juan R. Trapero^c

^aDepartamento de Ingeniería Química. Universidad de Castilla-La Mancha. Edif. Enrique Costa Novella, Avda. Camilo Jose Cela n 12, 13071, Ciudad Real, España. ^b Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Castilla-La Mancha. ITQUIMA, Avda. Camilo Jose Cela s/n, 13071, Ciudad Real, España. ^c Departamento de Administración de Empresas. Universidad de Castilla-La Mancha. Edif. Iparraguirre, Avda. Camilo Jose Cela s/n, 13071, Ciudad Real, España

Economic assessment of microbial fuel cells for wastewater treatment and energy production. A juice industry case study

Estudi de viabilitat econòmica de la implantació de biocel·les en una planta de tractament d'aigües residuals

Recibido: 2 de octubre de 2013; revisado: 27 de enero de 2014; aceptado: 29 de enero de 2014

RESUMEN

Las aguas residuales generadas en la industria de los zumos se caracterizan entre otras cosas por presentar altas concentraciones de materia orgánica, la cual es muy costosa de eliminar con los tratamientos que existen actualmente. En los últimos años están surgiendo numerosos estudios en torno al uso de celdas de combustible microbiológicas o bioceldas como método de tratamiento de aguas residuales. En este artículo se ha realizado un estudio de viabilidad económica de la implantación de 10 bioceldas para tratar las aguas residuales generadas en una industria de este tipo. Para ello, se analizaron tres posibles escenarios que podrían darse utilizando estos sistemas y se compararon los resultados obtenidos con el uso de un reactor convencional de fangos activos. Los resultados obtenidos para el VAN mostraron que la utilización de bioceldas podría proporcionar un ahorro comprendido entre un 10 y 20 % aproximadamente dependiendo de si es un escenario pesimista u optimista, respectivamente, teniendo en cuenta un tiempo de vida de la planta de 15 años. El área de electrodo por celda considerada en este estudio fue de 0,36 m², la cual dio lugar a densidades de potencia algo más altas que las encontradas en la bibliografía. Por ello, se decidió realizar un análisis de sensibilidad considerando áreas de electrodo de 0,5 m² y 0,8 m² en las bioceldas. Se encontró que aún utilizando áreas de 0,5 m² el VAN seguiría siendo positivo en todos los escenarios considerados y para el valor de 0,8 m² se obtuvieron también resultados favorables en el escenario optimista. Estos resultados muestran que siempre que se cumplan los criterios establecidos en este estudio, la depuración mediante bioceldas en una industria de este tipo podría ser una alternativa más rentable que la depuración convencional mediante fangos activos.

Palabras claves: Aguas residuales; biocelda; economía; energía; VAN

SUMMARY

The juice industry wastewater is characterized by a high organic load concentration, which requires an expensive treatment. Recent investigations propose microbial fuel cells as a wastewater treatment alternative. This article reports an economic assessment of the implementation of 10 microbial fuel cells to deal with wastewaters in a juice industry. The proposed method was compared with the standard activated sludge treatment, where different scenarios were considered. The results show that the investment Net Present Value obtained by the bio cells could provide significant savings around 10 % and 20 % depending whether the scenario was either pessimistic or optimistic, respectively, for a plant lifetime of 15 years. The electrode area considered was set to 0.36 m², what resulted in power densities higher than previous results in the literature. In order to verify our results, a sensitivity analysis was carried out by varying the electrode area to 0.5 m² and 0.8 m². In summary, even for relatively high areas of 0.5 m² the Net Present Value was still positive for every scenario and for the area of 0.8 m², the optimistic scenario provided positive values. These results corroborate that the wastewater treatment based on microbial fuel cells may provide a profitable alternative with regards to the conventional activated sludge process.

Keywords: Wastewater; Microbial fuel cell; Investment Economics; Energy; Net Present Value

RESUM

Les aigües residuals generades en la indústria dels sucres es caracteritzen entre altres coses per presentar altes con-

*Autor para la correspondencia: Tel. +34 926 295 300; Fax: +34 926 295 318; Justo.Lobato@uclm.es; Juanramon.trapero@uclm.es

centracions de matèria orgànica, la qual és molt costosa d'eliminar amb els tractaments que existeixen actualment. En els últims anys estan sorgint nombrosos estudis entorn de l'ús de cel·les de combustible microbiològiques o biocel·les com a mètode de tractament d'aigües residuals. En aquest article s'ha realitzat un estudi de viabilitat econòmica de la implantació de 10 biocel·les per tractar les aigües residuals generades en una indústria d'aquest tipus. Per a això, es van analitzar tres possibles escenaris que podrien donar-se utilitzant aquests sistemes i es van comparar els resultats obtinguts amb l'ús d'un reactor convencional de fangs actius. Els resultats obtinguts per al VAN mostraren que la utilització de biocel·les podrien proporcionar un estalvi comprès entre un 10 i 20% aproximadament, depenent de si és un escenari pessimista o optimista, respectivament, tenint en compte un temps de vida de la planta de 15 anys. L'àrea d'elèctrode per cel·la considerada en aquest estudi va ser de 0,36 m², la qual va donar lloc a densitats de potència una mica més altes que les trobades en la bibliografia. Per això, es va decidir realitzar una anàlisi de sensibilitat considerant àrees d'elèctrode de 0,5 m² i 0,8 m² en les biocel·les. Es va trobar que encara utilitzant àrees de 0,5 m² el VAN seguiria sent positiu en tots els escenaris considerats i per al valor de 0,8 m² es van obtenir també resultats favorables a l'escenari optimista. Aquests resultats mostren que sempre que es compleixin els criteris establerts en aquest estudi, la depuració mitjançant biocel·les en una indústria d'aquest tipus podria ser una alternativa més rendible que la depuració convencional mitjançant fangs actius.

Mots clau: Aigües residuals; biocel·la; economia; energia; VAN

1. INTRODUCCIÓ.

La mayoría de los procesos de tratamiento de aguas residuales suelen requerir una gran cantidad de gasto energético. Por ello, hay una necesidad urgente de nuevos métodos sostenibles, asequibles, seguros y robustos para depurar el agua. Las celdas de combustible microbiológicas o bioceldas (*Microbial Fuel Cells*, *MFCs* en inglés) se presentan como una excelente opción a tener en cuenta para el tratamiento de aguas residuales, ya que, además de reducir la materia orgánica, la utilizan para generar energía y hacer así el proceso más sostenible. Las aguas residuales contienen energía en forma de materia orgánica biodegradable, la cual, con los tratamientos actuales se pierde con el fin de eliminar dicha materia orgánica, en lugar de tratar de recuperarla. Por ejemplo, en una estación de depuración de aguas en Toronto (Canadá), se estimó que en el agua residual había 9,3 veces más energía de la necesaria para el tratamiento de dicha agua (Shizas y Bangle, 2004).

Las celdas de combustible microbiológicas son sistemas bioelectroquímicos capaces de depurar un amplio rango de sustancias orgánicas, incluyendo distintos tipos de aguas residuales, y generar energía eléctrica en ese proceso de depuración. En el caso de aguas residuales esto equivale a decir que las MFCs son capaces de reducir la demanda química de oxígeno del agua al mismo tiempo que producen electricidad a partir de esa materia contaminante eliminada. En una celda de combustible microbiológica, un sustrato (generalmente materia orgánica)

es oxidado mediante un proceso biológico en el que los microorganismos liberan electrones a una superficie anódica. Los electrones fluyen a través de una carga externa, generando corriente eléctrica, y llegan hasta el cátodo, donde son liberados y son capaces de reducir un oxidante como es el oxígeno (Logan, 2008; Rabaey y col., 2005). De este modo, el oxígeno, en el compartimento catódico actúa como aceptor terminal de electrones y se transforma en agua cuando reacciona con los protones generados durante la oxidación de la materia orgánica contenida en el compartimento anódico. Por otro lado, existen varias formas de separar los dos compartimentos anódico y catódico, bien mediante un puente salino (Rodrigo y col., 2007), placas de grafito (Lobato y col., 2012) o mediante membranas poliméricas de intercambio protónico (González del Campo y col., 2013). En la bibliografía se pueden encontrar esquemas detallados del funcionamiento de estos sistemas (Cañizares y col., 2009).

Los ahorros de energía más significativos asociados al uso de estos sistemas para el tratamiento de aguas, además de la generación de electricidad, resultan de los gastos para la aireación y el manejo de sólidos. Los mayores costes de operación en el tratamiento de aguas residuales, residen en la aireación, el tratamiento del fango y el bombeo del agua. Sólo la aireación puede suponer la mitad de los costes de operación en una planta de tratamiento de aguas residuales (Logan, 2008). Eliminar estos costes puede suponer el ahorro de una cantidad apreciable de energía. La producción de fangos en un proceso anaerobio es aproximadamente un 20% menos que para los procesos aerobios. Así, usando celdas de combustible microbiológicas (proceso anaerobio), podría reducirse drásticamente la producción de sólidos en una planta de tratamiento de aguas residuales, reduciendo de esta forma, sustancialmente, los costes de operación para el tratamiento del fango.

En España, la industria de productos de alimentación y bebidas es la primera rama industrial, según la última Encuesta Industrial de Empresas del *INE*, a 31 de diciembre de 2011, representando el 19,66% de las ventas netas de producto, el 17,48% del empleo industrial, el 16,96% de las inversiones en activos materiales y el 15,29% del valor añadido. Debido a su importancia, parece interesante estudiar el tratamiento de las aguas residuales relativas a una industria de este tipo (web Magrama, 2013).

La generación de aguas residuales en las industrias productoras de zumos es de especial relevancia, dado su elevado consumo de agua. Aproximadamente, el 70-80% del consumo de agua se vierte en forma de aguas residuales. Los procesos anaerobios son factibles cuando las aguas presentan altas concentraciones de materia orgánica. Los efluentes contaminados de las industrias de zumos de frutas contienen altas concentraciones de materia orgánica (principalmente azúcares y grasas). Es interesante, entonces, llevar a cabo la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales por una parte y, por otra, generar electricidad.

Desde este punto de vista, la instalación de un sistema de bioceldas, MFCs podría dar lugar a una disminución drástica de gran parte de los costes operativos de una planta de tratamiento de aguas residuales, proporcionando además, un beneficio extra, tanto económico como medioambiental, ya que:

- La energía eléctrica generada puede usarse para el movimiento de bombas y soplantes presentes en

la instalación, disminuyendo aún más los costes de electricidad en la planta.

- Se genera energía de forma limpia, sin perjudicar al medio ambiente.

Por todo lo expuesto hasta ahora, el objetivo principal del presente trabajo es analizar si sería viable económicamente instalar este tipo de sistema como tratamiento biológico en el proceso de depuración de las aguas residuales generadas en una industria de zumos.

El artículo se estructura de la siguiente forma: la sección 2 formula el problema y describe el caso de estudio; la sección 3 expone los principales resultados y finalmente, la sección 4 resume las conclusiones del trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL CASO.

El propósito de la utilización de celdas de combustible microbológicas para el tratamiento de las aguas residuales de una industria de zumos radica en tratar el agua y obtener durante este proceso un producto de valor agregado como es la electricidad. Es decir, ver el tratamiento del agua no sólo como algo necesario para la sustentabilidad, sino también como un proceso que valoriza la materia orgánica presente.

Normalmente, el proceso de tratamiento típico del agua residual instalado en una industria de zumos consta de las etapas que se mencionan a continuación (El-Kamah y col., 2010).

Etapas de pretratamiento. El primer paso consiste en eliminar los residuos sólidos y las partículas procedentes del lavado de la fruta (desbaste). Tras ello, el efluente se bombea hasta un tanque de homogeneización que servirá para almacenar y a la vez mezclar los efluentes procedentes del proceso de producción de los distintos zumos para obtener un único efluente que pueda ser enviado a la segunda etapa de depuración de aguas residuales, el reactor biológico.

Etapas de tratamiento biológico mediante fangos activos. Esta es la etapa principal y tiene como objetivo degradar la materia orgánica disuelta en el efluente homogeneizado. Es la etapa en la que se va a eliminar la mayor parte de la carga contaminante del efluente y se realiza mediante el uso de microorganismos, proceso comúnmente conocido como fangos activos. Tras llevar a cabo esta etapa se comprueba que el efluente obtenido ya cumple con los límites de vertido a la red de alcantarillado. Este proceso es de tipo aerobio por lo que precisa de aireación prolongada proporcionada por soplates, lo que da lugar a una cantidad importante de gastos eléctricos para mantener esta aireación.

Decantador secundario. En este punto, se procede a la clarificación del efluente mediante la separación del fango, se obtienen dos corrientes:

- Corriente de fango: éste sedimentará en la parte de abajo del decantador. Una parte de este fango será recirculado de nuevo al reactor biológico con el fin de mantener la concentración de microorganismos presentes y la otra se conducirá a un proceso de tratamiento con el fin de deshidratarlo y poder gestionarlo.
- Corriente efluente final: que corresponde con el agua tratada y cumple los límites de vertido a la red de saneamiento público.

Espesado del fango y deshidratación. Estos dos pasos corresponden con los procesos de tratamiento del fango con el fin de poder gestionarlo y consta de dos pasos:

- Espesado: se tiene un espesador por gravedad con el objetivo de reducir el volumen del fango a tratar antes de llevarlo a deshidratación.
- Deshidratación: mediante una máquina centrífuga se consigue deshidratar un porcentaje importante del fango para poder ser gestionado correctamente. Una parte de éste es recirculado al inicio del proceso de tratamiento.

Tras todo el proceso de tratamiento se obtiene un efluente final de calidad apta para vertido a la red de alcantarillado y, como único residuo, un fango biológico que ha de ser enviado a un gestor de residuos.

En la planta que se ha tomado como base para realizar el estudio económico únicamente se ha sustituido la etapa de tratamiento biológico mediante fangos activos por un sistema de celdas de combustible microbológicas, que lleven a cabo la eliminación de la mayor parte de la carga orgánica contenida en el agua residual, igualmente, mediante la utilización de microorganismos, pero en este caso anaerobios. De esta forma el esquema de la planta quedaría como se muestra en la Figura 1, siendo un sistema más sostenible con un valor agregado y ahorro de energía.

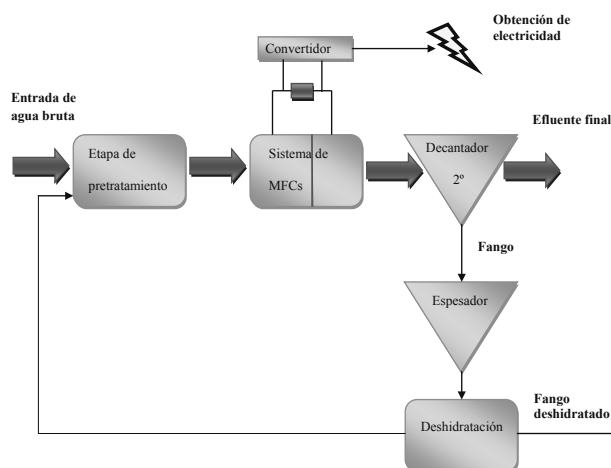


Figura 1: Diagrama de flujo del sistema de depuración de aguas residuales en una industria de zumos utilizando celdas de combustible microbológicas.

En cuanto a la arquitectura del sistema de celdas de combustible microbológicas, se decidió seleccionar un total de 10 MFCs conectadas en serie, con unas dimensiones de 2,25 m³ para el ánodo y 1,125 m³ para el cátodo cada una de ellas.

Cada una de las celdas consiste en un depósito de metacrilato de 20 mm de espesor con una ventana en la pared que separa ambos compartimentos, donde se instala la correspondiente membrana de intercambio protónico (llamada PEM debido a sus iniciales en inglés).

En cuanto a los electrodos, tanto los ánodos como los cátodos son de tela de carbón con una superficie de 0,36 m² cada uno de ellos. La membrana de intercambio protónico se sitúa en la pared que separa el compartimento anódico y catódico, en su parte central y permite el tránsito de protones del ánodo al cátodo. Cada una de las PEM tiene una superficie de 0,49 m².

Para definir el sistema que se propone hay que tener en cuenta un parámetro importante como es el tiempo de residencia. El tiempo de residencia representa el tiempo promedio que los reactivos permanecen en el interior del reactor y se calcula mediante la Ecuación 1.

$$t_{residencia} = \frac{V}{Q} \quad [1]$$

Siendo V (m^3) el volumen del reactor y Q (m^3/h) el caudal de alimentación a tratar.

Se ha tomado como base de cálculo un caudal de aguas residuales a tratar de $54 m^3/día$ y sabiendo que el volumen del reactor se corresponde con el volumen total del compartimento anódico, se aplicó la Ecuación 1 para conocer el tiempo de residencia. El valor que se obtuvo es de 10 horas. Este valor coincide con otros estudios realizados. El grupo de El-Kamah utilizó el mismo valor (El-Kamah y col., 2010), mientras que el grupo de Fornero utilizó un tiempo de residencia de 8 horas (Fornero y col., 2010).

Otra variable importante a tener en cuenta es la potencia producida en una celda de combustible microbiológica, que no sólo depende del diseño de la misma sino también de otros factores, entre los que cabe destacar por su importancia, el catalizador utilizado en el cátodo (Morris y col., 2007). En el cátodo se produce la reducción del oxígeno la cual es muy lenta a temperatura ambiente e influye directamente en la corriente eléctrica producida por el circuito externo. Así, dependiendo de si se usa o no catalizador en el cátodo se obtiene un valor determinado de voltaje que afecta a la potencia generada según la Ecuación 2.

$$P = V \cdot I \quad [2]$$

Uno de los catalizadores más efectivos y más utilizados en las celdas de combustible microbiológicas es el platino (Logan y col., 2006). Por ello, el presente estudio se llevó a cabo considerando cátodos con platino. Por lo tanto se definen dos casos:

- CASO A. Depuración del agua residual utilizando celdas de combustible microbiológicas con catalizador de platino en los cátodos.
- CASO B. Depuración convencional mediante un reactor de fangos activos.

A continuación, se procede a detallar los cálculos necesarios para obtener el valor de la potencia teórica generada en el Caso A.

Será necesario definir en primer lugar el término de eficiencia culómbica. Se define como el porcentaje de electrones que se consiguen obtener en forma de corriente eléctrica a partir de la materia orgánica. La eficiencia culómbica (CE) se podría expresar mediante la siguiente relación:

$$CE = \frac{\text{culombios recuperados como energía}}{\text{culombios totales en el sustrato}} \quad [3]$$

A partir de la Ecuación 3, integrando el valor de la corriente obtenida al cabo de un tiempo conocido y operando la expresión, se obtiene el número de culombios totales transferidos en nuestro sistema (Logan y col., 2006; Cheng y col., 2006). Así, puede calcularse la eficiencia culómbica de una celda de combustible microbiológica mediante la Ecuación 4.

$$CE = \frac{8 \cdot I}{F \cdot Q \cdot \Delta DQO} \quad [4]$$

Los términos que intervienen en la Ecuación 4 son los siguientes: La DQO es la demanda química de oxígeno. Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas (concentración de materia orgánica) por medios químicos en una muestra de agua. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mgO_2/L); 8 es una constante usada para la DQO , basada en el peso molecular del oxígeno y los electrones intercambiados ($M_{O_2}=32$ y 4 electrones intercambiados por mol de oxígeno), dividiendo ambos términos se obtiene este valor; I (A) es la intensidad de corriente que circula a través del sistema; F es la constante de Faraday cuyo valor corresponde con $96.500 C/mol$; el término Q es el caudal volumétrico (L/s) e ΔDQO es la cantidad de DQO eliminada.

Una vez definida la eficiencia culómbica, se puede calcular el valor de la intensidad de corriente que se tiene. Despejando la intensidad de la Ecuación 4, se llega a la Ecuación 5.

$$I = \frac{CE \cdot F \cdot Q \cdot \Delta DQO}{8} \quad [5]$$

Como se puede observar en la Ecuación 5, la intensidad de corriente I (A) que circula por el sistema es función de: la eficiencia culómbica que se alcance, CE ; la constante de Faraday, F , cuyo valor se corresponde con $96.500 C/mol$; el caudal volumétrico, Q , que se tiene en el sistema (L/s); y la cantidad de DQO eliminada, ΔDQO (g/L).

En el presente estudio, se consideró que las aguas residuales procedentes de la industria de zumos suelen tener una DQO inicial de $15.000 ppm$ aproximadamente. Teniendo en cuenta que la calidad final del agua debe ser apta para su vertido a la red de saneamiento público, se asumió que el porcentaje de eliminación de DQO alcanzado con las celdas de combustible microbiológicas es de un 90%. Se comparó este dato con los de la bibliografía para verificar que en diferentes experimentos similares realizados a escala de laboratorio se alcanzaron resultados parecidos. Se comprobó que el grupo de Shimoyama llegó a un 95% de eliminación de DQO (Shimoyama y col., 2008), mientras que el grupo de Liu alcanzó un 80% con un tiempo de retención de 6 horas (Liu y col., 2004), y el grupo de He consiguió alcanzar un 90% de eliminación de DQO (He y col., 2005).

Se consideraron valores de eficiencia culómbica entre un 2 y un 30%. No se consideraron valores mayores debido a que los microorganismos necesitan utilizar parte de la energía para realizar sus funciones vitales (Rodrigo y col., 2007).

En la Tabla 1 se presentan los resultados que se obtuvieron en el cálculo de la intensidad de corriente suponiendo distintos valores de eficiencia culómbica.

Tabla 1: Resultados de intensidad de corriente y densidad de corriente en función de la eficiencia culómbica.

CE (%)	Intensidad de corriente (A)	Densidad de corriente (A/m^3)
2	203,5	90,47
5	508,9	226,17
10	1.017,8	452,34
15	1.526,7	678,52
20	2.035,5	904,68
30	3.053,3	1.357,03

Como se puede observar en la Tabla 1, al aumentar la eficiencia culómbica, aumenta también la intensidad de corriente. Esta tendencia es lógica porque un valor de eficiencia culómbica mayor significa que los microorganismos utilizan mayor cantidad de energía en la producción de electricidad, es decir, se recupera mayor cantidad de culombios como energía, según muestra la Ecuación 3. Se han mostrado los valores de intensidad también en términos de densidad de corriente para poder comparar los resultados obtenidos con los de la bibliografía. El grupo de Fan (Fan y col., 2012) alcanzó una densidad de corriente de 7.600 A/m³, mientras que el grupo de Dekker (Dekker y col., 2009) obtuvo 30A/m³, por lo que se comprueba que los valores teóricos obtenidos se encuentran dentro del rango alcanzado por otros autores.

En función de los resultados obtenidos se seleccionaron tres posibles escenarios de análisis para el Caso A:

- Escenario optimista: Se consideró una eficiencia culómbica del 20%.
- Escenario medio: Se escogió un valor de eficiencia culómbica del 10%.
- Escenario pesimista: Se seleccionó una eficiencia culómbica del 5%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Valores de densidad de potencia.

Con el fin de que el procedimiento seguido quede claro se muestran los cálculos realizados para el escenario optimista a modo de ejemplo. Para ello, se parte de los datos que aparecen en la Tabla 1, que para el escenario optimista se corresponden con un valor de eficiencia culómbica (CE) del 20 % y una intensidad de corriente (I) de 2035,5 A. Se supuso un valor de 0,7V/celda (Morris y col., 2007), que es un valor típico cuando se utilizan cátodos con platino, siendo el valor total de 7V para las 10 celdas, ya que al estar dispuestas en serie, el valor del voltaje se suma. Siguiendo con el ejemplo de cálculo, se sustituye el valor de intensidad de corriente (I) para el escenario optimista y el voltaje considerado (V) en la Ecuación 2, obteniéndose así el valor de la potencia (P) para este escenario. Es importante destacar que se consideró un valor de pérdidas energéticas del 10% al realizar el cálculo de la potencia (P), por ello se multiplica por 0,9. Esta acción se llevó a cabo para compensar pérdidas tanto de la caída de tensión como las asociadas al convertidor DC-AC. Por tanto, el cálculo queda de la siguiente forma:

$$P_{\text{optimista}} = 7V \cdot 2035,5A \cdot 0,9 = 12823,9W$$

Por último, una vez se obtuvo el valor de la potencia para cada escenario, únicamente fue necesario calcular la densidad volumétrica de potencia (W/m³) mediante la ecuación 6, dividiendo la potencia (P) entre el volumen del ánodo (V), con objeto de normalizar los valores obtenidos y poder compararlos con la bibliografía para confirmar que coinciden.

$$\text{Densidad de potencia} = \frac{P}{V} \quad [6]$$

Se recuerda que el volumen del compartimento anódico de cada celda es de 2,25m³ y que se han considerado 10 celdas, por lo que el volumen total del ánodo es de 22,5m³

Sustituyendo los valores del escenario optimista en la ecuación 6 se tiene:

$$\text{Densidad de potencia}_{\text{optimista}} = \frac{12823,9W}{22,5m^3} = 569,9 \frac{W}{m^3}$$

En la Figura 2 se puede observar cómo varía la densidad de potencia en función de la eficiencia culómbica para cada porcentaje de eliminación de DQO. Se han marcado mediante tres líneas horizontales los escenarios que se seleccionaron para realizar el análisis económico.

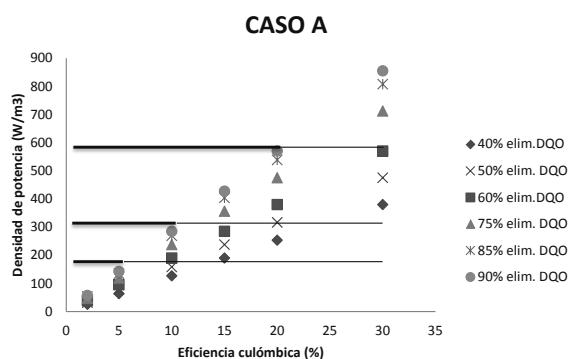


Figura 2: Variación de la densidad de potencia frente a la eficiencia culómbica en el Caso A.

En cuanto a la cantidad de DQO eliminada, a la vista de los resultados obtenidos, se puede explicar fácilmente su tendencia, ya que al aumentar el porcentaje de eliminación de DQO la intensidad obtenida es mayor también (Ecuación 5), aumentando así la potencia según la Ecuación 2, ya que el voltaje permanece constante. Al aumentar la densidad de potencia se produce mayor cantidad de electricidad por m³ de agua residual tratada.

En la Figura 2, puede apreciarse también cómo el escenario medio se puede alcanzar también con una eficiencia culómbica del 15% y un 60% de eliminación de DQO. A pesar de generar la misma cantidad de electricidad, en esta situación no se conseguiría verter el agua por debajo de los límites permitidos. De igual manera ocurre con el escenario optimista, que también se podría alcanzar con una eficiencia culómbica del 30% y un 60% de eliminación de DQO pero sucedería lo mismo que en el escenario medio. En la Tabla 2 se resumen los valores de diferentes parámetros energéticos obtenidos para cada escenario en el Caso A. Se compararon los resultados mostrados en la Tabla 2 con los de la bibliografía, y se comprobó que se encuentran dentro del rango obtenido por otros autores. Así, el grupo de Fan consiguió alcanzar 1,01 kW/m³ en el año 2007 y en el año 2012 llegaron a obtener 2,08 kW/m³ (Fan y col., 2007; Fan y col., 2012). Por otro lado, también se recogen valores más pequeños como los 0,011 kW/m³ que obtuvo el grupo de Dekker (Dekker y col., 2009).

Tabla 2: Valores de Intensidad (I), potencia (P_{total}) y densidad de potencia (P_{dens.}) volumétrica, en función del volumen de ánodo, en kW/m³ o geométrica, en función del área de los electrodos, en kW/m² obtenidos para cada escenario en el Caso A.

CASO A				
	I (A)	P _{total} (kW)	P _{dens.} (kW/m ³)	P _{dens.} (kW/m ²)
Escenario optimista	2035,5	12,8	0,57	3,56
Escenario medio	1017,8	6,4	0,29	1,78
Escenario pesimista	508,9	3,2	0,14	0,89

3.2. Criterio de viabilidad económica.

El criterio de viabilidad económica que se utilizó con el fin de determinar cuál de las opciones sería la más adecuada (Caso A o Caso B) fue el Valor Actual Neto (*VAN*) y la Tasa Interna de Rentabilidad (*TIR*) (Trapero y col., 2013). El *VAN* se puede calcular a partir de la Ecuación 7.

$$VAN_k = -A + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+k)^i(1+\lambda)^i} \quad [7]$$

Donde: *A* es el capital requerido o desembolso inicial; Q_i es el valor del flujo de caja obtenido en el año *i*; *k* es la tasa de descuento, que en la Ecuación 7 se establece como la rentabilidad mínima, la cual se ha supuesto constante; *n* es el número de años de vida útil que se espera del proceso y λ se corresponde con el valor de la inflación anual. De acuerdo con la Ecuación 7, si el valor del *VAN* es mayor que cero el proyecto se considera rentable, en cambio si el *VAN* es menor que cero el proyecto no será rentable. Además del *VAN*, otro criterio comúnmente empleado para analizar la viabilidad económica de una inversión es la *TIR*, el cual se define como la tasa de descuento (*k*) que hace que el *VAN* sea igual a cero, como muestra la Ecuación 8:

$$-A + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+TIR)^i(1+\lambda)^i} = 0 \quad [8]$$

Aplicando esta ecuación, un proyecto se considera rentable si la *TIR* es mayor que la rentabilidad mínima.

La primera variable que se analizó a la hora de realizar el cálculo del *VAN* fue el **Desembolso Inicial (A)** para cada una de las alternativas. Únicamente se tuvo en cuenta el coste de los equipos y materiales asociados al tratamiento biológico en cada caso, ya que el resto de los costes se consideró igual tanto para el Caso A como para el Caso B. Las partidas consideradas para el cálculo del desembolso inicial en el Caso A fueron las siguientes:

- **Depósitos de metacrilato.** Utilizados en la construcción de las celdas de combustible microbiológicas.
- **Electrodos.** Incluyendo tanto a los ánodos como a los cátodos. Al utilizar platino en los cátodos el precio de éstos es más elevado que de los ánodos.
- **Membranas PEM.** Situadas en cada una de las celdas para permitir el paso del ánodo hacia el cátodo de los iones H^+ necesarios para que se produzca la reacción de reducción.
- **Convertidor DC-AC.** Se utilizó para transformar la corriente eléctrica producida por las celdas de corriente continua a corriente alterna.
- **Bombas.** Se consideró instalar dos, una de ellas de reserva. Existiendo una única bomba en funcionamiento cuya potencia es de 0,75 kW que sería capaz de bombear el agua residual a las 10 celdas.
- **Soplante.** Proporciona oxígeno en el compartimento catódico necesario para llevar a cabo la reacción redox y formar agua. La potencia del motor es de 5,5 kW mientras que la potencia absorbida se corresponde con un valor de 4,6 kW. Igualmente, se concluyó que una única soplante sería necesaria para proporcionar el oxígeno al compartimento catódico de cada una de las 10 celdas de combustible microbiológicas instaladas.

Las partidas que se tuvieron en cuenta en el Caso B son las que se muestran a continuación:

- **Bombas.** Al igual que en el Caso A se consideró instalar dos, siendo una de ellas de reserva, con las mismas características. En este caso la bomba impulsaría el agua residual para su tratamiento en el reactor biológico de fangos activos convencional.
- **Soplante.** Proporciona oxígeno en todo el volumen del reactor biológico de fangos activos y las características que presenta son las mismas que en el Caso A.
- **Reactor de fangos activados.** Se refiere al coste del reactor aerobio en sí utilizado como tratamiento biológico del agua residual en este caso. Tras consultar con expertos en el tema, se consideró disponer de un reactor biológico de fangos activos con un volumen de 100 m³ por ser el más comúnmente utilizado.

En la Tabla 3 se presenta el desembolso inicial que se calculó para cada caso. Concretamente, se estimó que el desembolso inicial del Caso A es un 24 % superior al Caso B. El precio de las distintas partidas se obtuvo consultando a diferentes empresas especializadas en el sector.

Tabla 3: Costes de los equipos para el cálculo del desembolso inicial (€).

	CASO A	CASO B
Depósitos	34.300	-
Electrodos (Ánodos)	1.500	-
Electrodos (Cátodos)	3.300	-
Membranas PEM	4.200	-
Convertidor DC-AC	500	-
Bombas	500	500
Soplante	500	500
Reactor convencional	-	35.000
Desembolso inicial (A)	44.800	36.000

3.2.1. Cálculo de los flujos de caja.

El siguiente paso que se siguió con el fin de obtener el valor del *VAN* fue llevar a cabo el cálculo de los **Flujos de Caja (Q)** obtenidos en cada año de vida de la planta.

En el caso particular de este estudio, no se obtiene beneficio económico anual alguno, ya que la energía que se produce no se vende, sino que se destina a abastecer el sistema y por ende, a reducir el consumo energético total. Para poder realizar el cálculo de los flujos de caja se supuso que los pagos coinciden con la suma de los gastos operativos y los gastos extra que se pudieran producir debido a repuestos de alguno de los equipos o materiales utilizados cuando finalizara su tiempo de vida útil, como por ejemplo, cambio de los electrodos o las membranas de intercambio protónico en el caso de las celdas de combustible.

• Cálculo de los flujos de caja para el Caso B.

En primer lugar, se procedió al cálculo de los gastos operativos anuales correspondientes con esta opción.

En una planta de depuración de aguas residuales los gastos operativos se pueden desglosar en distintas partidas, y cada una de ellas se corresponde con un porcentaje de los gastos operativos totales. En la Tabla 4 se muestran las distintas partidas a tener en cuenta así como el porcentaje que suponen cada una de ellas respecto a los gastos ope-

rativos totales cuando se utiliza un reactor biológico de fangos activos (Escapa, 2012).

Tabla 4: Porcentajes que corresponden a cada una de las partidas de los gastos operativos para el tratamiento de aguas residuales cuando se utiliza un reactor de fangos activos.

Gastos operativos (partidas)	% Gastos operativos totales
Laboral	35,4
Mantenimiento	10
Formación	0,6
Seguros	1
Gestión de Fangos	19
Electricidad consumida	34

Mediante este método de porcentajes se calcularon los gastos operativos que se tendrían si se elige la opción del tratamiento biológico convencional (Caso B). Conocido el consumo eléctrico se calcularon los gastos operativos totales y a partir de éstos se calcularon el resto de las partidas.

La partida relativa a la electricidad consumida se obtuvo a partir del consumo eléctrico diario de cada uno de los equipos que intervienen en la planta depuradora, siendo el valor total de 96,05 kWh/día. El precio de la electricidad, incluyendo también el coste fijo de electricidad e impuestos se estimó en 0,09 €/kWh.

Así, aplicando los porcentajes que aparecen en la Tabla 4 se tienen los gastos operativos para las diferentes partidas del Caso B. Éstos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados para las diferentes partidas de los gastos operativos del Caso B.

CASO B	
Partidas	Gastos operativos (€/año)
Laboral	3.285
Mantenimiento	928
Formación	56
Seguros	93
Gestión de Fangos	1.763
Electricidad consumida	3.155
Total	9.280

Para calcular los flujos de caja en el Caso B se asume que los pagos correspondientes a cada año coinciden con los gastos operativos y una inflación anual del 2%, además se considera un tiempo de vida de la planta de 15 años. La Tabla 6 muestra los flujos de caja para el Caso B, así como para el Caso A, los cuales se detallan a continuación.

• **Cálculo de los flujos de caja para el Caso A.**

Para obtener en este caso el valor de las distintas partidas correspondientes a gastos operativos, se consideró que se mantendrían constantes respecto del Caso B los gastos operativos relativos a las partidas: Laboral, Mantenimiento, Formación y Seguros. Sí se aprecian cambios en las partidas de Gestión de Fangos y Electricidad consumida.

Para obtener los gastos de operación relativos a la gestión de fangos se tuvo en cuenta que los fangos en procesos anaerobios, como el que se está estudiando, se reducen en un 20% respecto de los procesos aerobios. Se asumió de esta forma que los gastos correspondientes a la gestión de los mismos se reducen igualmente en un 20%.

Así, en el Caso A los gastos de gestión de fangos se consideraron un 80% del resultado obtenido para el Caso B. La electricidad total consumida en la planta puede dividirse en tres partidas:

- Gastos fijos de electricidad: bombeo, consumo de luz en la planta, etc. Este valor fijo coincide en ambos casos de estudio (A y B).
- Electricidad consumida en aireación. Se refiere al consumo eléctrico de la soplante. En el Caso B es mayor debido a que se corresponde con la electricidad necesaria para airear el reactor de fangos activos en su totalidad. En el Caso A es menor, ya que únicamente se airean los cátodos cuyo volumen es más pequeño.
- Electricidad generada por las celdas. Ésta depende de la densidad de potencia producida en cada escenario. En el Caso B al tratarse del tratamiento convencional, la electricidad generada será cero.

Así, la electricidad total consumida, es decir, la electricidad que se compra, se expresa según la Ecuación 9.

$$E_{\text{Electricidad consumida}} = G_{\text{Fijos}} + G_{\text{aireación}} - E_{\text{generada}} \quad [9]$$

Se sabe que el consumo eléctrico diario de la soplante es de 55,2 kWh/día para un reactor biológico con un volumen de 100 m³ como el del Caso B. Teniendo en cuenta esto y el precio de la electricidad se pueden calcular los gastos anuales de aireación para el Caso B. Así, a partir de éstos y de la electricidad consumida en el Caso B, se obtuvo el valor de los gastos fijos utilizando la Ecuación 9.

Para calcular los gastos de electricidad correspondientes a la aireación para el Caso A se utilizó la Ecuación 10.

$$G_{\text{Aireación}} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = V_{\text{aireación}} \cdot P_e \cdot C_{\text{soplante}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \quad [10]$$

Donde: $V_{\text{aireación}}$ (m³) se corresponde con el volumen a airear, que en el Caso A corresponde al de los compartimentos catódicos; P_e (€/kWh) es el precio de la electricidad; y C_{soplante} (kWh/m³) se refiere a la electricidad que consume la soplante por cada m³ de agua residual que se airea (0,552 kWh/m³).

La única variable que queda por determinar para conocer la electricidad consumida en el Caso A se corresponde con la electricidad generada por las celdas. Ésta se calculó a partir de la Ecuación 11.

$$E_{\text{Generada}} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = Q \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot P_e \cdot P_{\text{dens.}} \quad [11]$$

Como se puede observar, la Ecuación 11 depende de: el caudal de agua tratada, Q (m³/día), que se corresponde con 54 m³/día en todos los casos de estudio; el precio de la electricidad, P_e (€/kWh); y la densidad de potencia, $P_{\text{dens.}}$ (kW/m³) cuyo valor depende del escenario que se presente.

Tabla 6: Resultados obtenidos para los Flujos de Caja y el VAN en cada Caso y Escenario considerado. (O = Escenario optimista; M = Escenario medio; P = Escenario pesimista).

AÑOS	FLUJOS DE CAJA (€/año)			
	CASO A			CASO B
	O	M	P	
1	-1.907	-2.403	-2.651	-4.822
2	-1.870	-2.356	-2.599	-4.727
3	-1.833	-2.310	-2.548	-4.635
4	-1.797	-2.264	-2.498	-4.544
5	-1.762	-2.220	-2.449	-4.455
6	-8.387	-8.836	-9.061	-4.367
7	-1.694	-2.134	-2.354	-4.282
8	-1.660	-2.092	-2.308	-4.198
9	-1.628	-2.051	-2.262	-4.115
10	-1.596	-2.011	-2.218	-4.035
11	-7.597	-8.003	-8.206	-3.956
12	-1.534	-1.933	-2.132	-3.878
13	-1.504	-1.895	-2.090	-3.802
14	-1.475	-1.857	-2.049	-3.728
15	-1.445	-1.821	-2.009	-3.654
VAN _{3%} (€)	-74.897	-80.123	-82.736	-86.846

Una vez calculada la electricidad consumida, se conocieron los gastos operativos para todas las situaciones propuestas. En la Tabla 7 se resumen los resultados obtenidos para las partidas que componen los gastos operativos y los gastos operativos totales para el Caso A con sus respectivos escenarios.

Tabla 7: Gastos operativos totales y Gastos operativos por partidas según el escenario considerado para el Caso A. Los datos mostrados presentan unidades de €/año. (O = Escenario optimista; M = Escenario medio; P = Escenario pesimista).

CASO A			
Laboral	3.285		
Mantenimiento	928		
Formación	56		
Seguros	93		
Gestión de Fangos	1.411		
Escenario	O	M	P
Electricidad consumida	535	1.040	1.293
Total gastos operativos	6.308	6.813	7.066

Como se puede observar en la Tabla 7, la única partida que hace variar el total de los gastos operativos en cada escenario es la electricidad consumida. Esto es razonable ya que es el único parámetro que depende de la densidad de potencia alcanzada (parámetro que marca cada uno de los escenarios). Al aumentar la densidad de potencia alcanzada, se genera más electricidad por lo que la energía que es necesario comprar es menor, reduciéndose así los gastos operativos totales.

Para calcular los flujos de caja anuales en el Caso A, se tuvo en cuenta que para los electrodos (ánodos y cátodos) y las membranas de intercambio protónico, el tiempo de vida útil se corresponde con 5 años, por lo que tanto en el año 6 como en el año 11 deben reponerse.

Por lo tanto, se calcularon los flujos de caja correspondientes teniendo en cuenta que el valor de los pagos en cada año coincide con la suma de los gastos operativos y el gasto en los repuestos, si procede, en el año considerado. Al igual que en el Caso B, se supuso una inflación anual del 2%, y se consideró un tiempo de vida de la planta de 15 años.

A continuación, se procedió a calcular el VAN para cada una de las situaciones propuestas utilizando la Ecuación 7 y suponiendo una tasa de rentabilidad mínima (k) igual al 3% (Escapa, 2012). Los resultados obtenidos para los flujos de caja así como para el VAN quedan recogidos en la última fila de la Tabla 6.

Como se puede observar en la Tabla 6 todas las situaciones consideradas presentan un valor del VAN negativo, lo cual era de esperar, ya que no se obtiene ingreso alguno por ventas. El caso es que la legislación obliga a verter el agua con una cantidad de materia orgánica que no supere la permitida.

Para poder analizar los resultados obtenidos con más claridad se decidió calcular un nuevo valor del VAN a partir de los resultados anteriores. Para ello, se calculó la diferencia existente tanto en el desembolso inicial como en los flujos de caja entre la utilización de MFCs y el uso de un reactor convencional de fangos activos. Se obtuvo así el VAN del Caso A respecto del Caso B, que de aquí en adelante lo denotaremos como VAN relativo. De esta forma, se puede apreciar el excedente económico que se tiene, es decir, el ahorro que generan las MFCs en el caso de ser el valor positivo o gasto extra si el valor es negativo. Se obtuvo también la TIR. En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos en esta comparativa.

Tabla 8: Comparativa de resultados obtenidos utilizando MFCs con respecto a la opción convencional. (O = Escenario optimista; M = Escenario medio; P = Escenario pesimista). Resultados expresados en €.

A (€)	Q (CASO A/CASO B)		
	8.800		
AÑOS	O	M	P
1	2.915	2.419	2.171
2	2.858	2.372	2.129
3	2.801	2.325	2.087
4	2.747	2.280	2.046
5	2.693	2.235	2.006
6	-4.020	-4.469	-4.693
7	2.588	2.148	1.928
8	2.537	2.106	1.890
9	2.488	2.065	1.853
10	2.439	2.024	1.817
11	-3.641	-4.047	-4.251
12	2.344	1.946	1.746
13	2.298	1.907	1.712
14	2.253	1.870	1.678
15	2.209	1.833	1.646
VAN _{3%}	11.949	6.724	4.111
TIR (%)	23	15	11

Si se observa la Tabla 8 puede apreciarse que el VAN relativo que se obtuvo fue positivo en todos los escenarios considerados para una tasa de descuento (k) del 3%. De esta forma se comprueba que a pesar de que la diferencia entre los desembolsos iniciales sea de 8.800 €, en 15 años se obtiene un ahorro respecto del tratamiento convencio-

nal que se refleja en el valor del VAN. Esto demuestra que, bajo unas condiciones de contorno similares a las analizadas en este estudio, la utilización de celdas de combustible microbiológicas para la depuración de las aguas residuales de una industria de zumos puede ser una alternativa más rentable que un proceso de depuración mediante fangos activos.

En cuanto a la *TIR* los resultados obtenidos en todas las situaciones planteadas fueron mayores del 3% considerado para la tasa de rentabilidad mínima en el cálculo del VAN relativo, lo que indica también que este proceso sería más beneficioso que el tratamiento convencional.

3.3. Análisis de sensibilidad. Variación del área de electrodo.

Se decidió estudiar la influencia del área de los electrodos utilizados en las celdas de combustible microbiológicas debido a que los resultados que se obtuvieron para la densidad de potencia geométrica (kW/m^2) en los escenarios seleccionados resultaron ser algo más elevados que los datos recogidos en la bibliografía. El grupo de Fan obtuvo $1,80 \text{ W/m}^2$ en 2007 mientras que en 2012 alcanzó $4,30 \text{ W/m}^2$ (Fan y col., 2007; Fan y col., 2012). Se realizó por ello, un análisis de sensibilidad de la rentabilidad con la variación del área de los electrodos.

Teniendo en cuenta que el área de cada electrodo que se utilizó para realizar este estudio fueron $0,36 \text{ m}^2$ y que el precio que se consideró para los mismos fue alrededor de 417 €/m^2 para los electrodos de tela de carbón y 917 €/m^2 para los electrodos con platino, se calculó el VAN que se alcanzaría en cada situación si se utilizaran electrodos de $0,5 \text{ m}^2$ y de $0,8 \text{ m}^2$. En la Figura 3 se representan los resultados que se obtuvieron respecto al cálculo del VAN relativo con la variación del área de los electrodos para el Caso A.

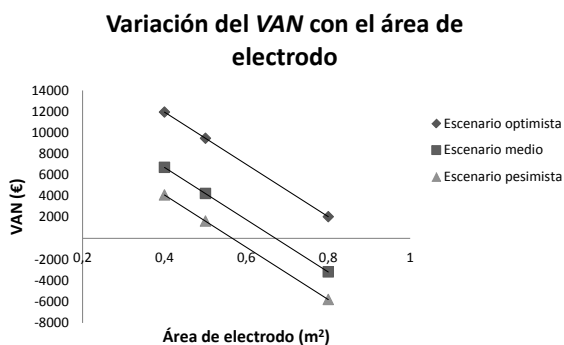


Figura 3: Rentabilidad obtenida con la variación del área de electrodo para los escenarios del Caso A.

Atendiendo a la Figura 3 se puede observar cómo al aumentar el área de los electrodos, el VAN relativo disminuye llegando incluso a adoptar valores negativos para el área de $0,8 \text{ m}^2$ en los escenarios medio y pesimista. Esta tendencia es lógica ya que al aumentar el área de los electrodos, se incrementa el valor del desembolso inicial para las MFCs, haciendo este proceso menos rentable. Por otro lado, se observa que en el caso del escenario optimista se podrían trabajar con electrodos de mayor tamaño y el VAN relativo sería positivo. Los valores negativos del VAN relativo indican que si se utiliza el área de electrodo que corresponde a dichos valores será más rentable económicamente la depuración convencional que la utilización de MFCs.

Así por ejemplo, para el caso del escenario medio ($6,4 \text{ kW}$), las MFCs serían aun rentables utilizando electrodos en cada celda de tamaño más grande ($0,6 \text{ m}^2$) que el planteado en el caso base ($0,36 \text{ m}^2$), lo que indicaría que la densidad de potencia necesaria sería de $1,01 \text{ kW/m}^2$, que es un valor más fácil de obtener.

4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se han realizado y explicado los pasos a seguir para llevar a cabo la evaluación económica de la implantación de bioceldas para tratar las aguas residuales generadas en una industria de zumos. A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer una serie de conclusiones.

1. Se ha demostrado que las celdas de combustible microbiológicas proporcionarían un ahorro en electricidad considerable. Éste se debe, por un lado, a que el volumen que es necesario airear es mucho menor que en el caso de un reactor biológico de fangos activos; y por otro lado, a que la energía producida por las MFCs puede ser aprovechada para consumo propio en la planta.
2. Los resultados obtenidos han demostrado que, a pesar de suponer un desembolso inicial mayor, la opción de utilizar bioceldas para tratar las aguas residuales (Caso A) proporciona, en teoría, un ahorro económico respecto de un reactor biológico de fangos activos (Caso B), siempre y cuando se cumplan los criterios que se han establecido para seleccionar los escenarios y los costes.
3. En cuanto al análisis de sensibilidad realizado, se ha demostrado que aún considerando un área de electrodo de $0,5 \text{ m}^2$, la utilización de bioceldas como método de depuración seguiría siendo más beneficiosa económicamente que el uso de un reactor convencional de fangos activos en cualquiera de los tres escenarios que se han planteado. Además, si el escenario presentado fuera el optimista seguirían obteniéndose beneficios incluso con áreas de electrodo de $0,8 \text{ m}^2$.
4. A pesar de los buenos resultados obtenidos en el presente estudio, hay que destacar que algunos de los datos que se han utilizado han sido obtenidos a partir de experimentos realizados a escala de laboratorio. Esto se debe a que la utilización de MFCs para el tratamiento de aguas residuales aún no ha sido estudiada experimentalmente a gran escala, ya que se trata de una opción bastante novedosa. No obstante, están surgiendo numerosos estudios a escala de planta piloto en los últimos años. Por lo que parece que esta tecnología goza de buena salud y sus perspectivas de futuro son bastante halagüeñas.
5. Por último, cabe señalar que este caso de estudio posee también una naturaleza didáctica ya que pone de manifiesto la necesidad de aunar decisiones multidisciplinares tanto técnicas como financieras y, aunque ambos enfoques, se suelen estudiar de forma aislada en numerosos grados y masters asociados a la ingeniería química, no es habitual encontrar casos de estudio que los conjuguen eficientemente, como el caso aquí presentado.

5. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la Junta de comunidades de Castilla-La Mancha la financiación prestada para realizar este estudio a través de la concesión del Proyecto de investigación de referencia POII 10-0329-5194.

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. Cañizares, P.; Rodrigo, M.A.; Lobato, J. Celdas de combustible microbiológicas: producción de energía eléctrica a partir de la depuración de aguas residuales. *Info enviro*. Enero 2009, 1-5.
2. Cheng, S.; Liu, H.; Logan, B.E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40, 2426-2432.
3. Dekker, A.; Ter Heijne, A.; Saakes, M.; Hamelers, H.V.M.; Buisman, C.J.N. Analysis and Improvement of a Scaled-Up and Stacked Microbial Fuel Cell. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 9038-9042.
4. El-Kamah, H.; Tawfik, A.; Mahmoud, M.; Abdel-Halim, H. Treatment of high strength wastewater from fruit juice industry using integrated anaerobic/aerobic system. *Desalination*. 2010, 253, 158-163.
5. Escapa, A. Biocatalyzed electrolysis for wastewater treatment and hydrogen production. 2012.
6. Fan, Y.; Hu, H.; Liu, H. Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *J. Power Sources* 2007, 171, 348-354.
7. Fan, Y.; Han, S.K.; Liu, H. Improved Performance of CEA Microbial Fuel Cells with Increased Reactor Size. *Energy and Environmental Science*. 2012, 5, 8273-8280.
8. Fornero, J.J.; Rosenbaum, M.; Angenent, L.T. Electric power generation from municipal, food and animal wastewaters using microbial fuel cells. *Electroanalysis*. 2010, 22, 832-843.
9. González del Campo, A.; Cañizares, P.; Rodrigo, M.A.; Fernández, F.J.; Lobato J. Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: A preliminary assessment, *J. Power Sources*, 2013, 242, 638-645.
10. He, Z.; Minteer, S.D.; Angenent, L.T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 5262-5267.
11. Liu, H.; Ramnarayanan, R.; Logan, B.E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 2281-2285.
12. Lobato, J.; Cañizares, P.; Fernández, F.J.; Rodrigo, M.A. An evaluation of aerobic and anaerobic sludge as start-up material for microbial fuel cell systems. *New Biotechnology*. 2012, 29, 415-420.
13. Logan, B.E.; Aelterman, P.; Hamelers, B., Rozendal, R.; Schröder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Verstraete, W.; Rabaey, K. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40(17), 5181-5192.
14. Logan, B.E. *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons, New Jersey. 2008. ISBN: 9780470239483.
15. http://www.magrama.gob.es/es/alimentacion/temas/industria-agroalimentaria/Informe_11_12_ok_tcm7-270397.pdf (Magrama. Consultado Septiembre, 2013)
16. Morris, J.M.; Jin, S.; Wang, J.; Zhu, C.; Urynowicz, M.A. Lead dioxide as an alternative catalyst to platinum in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*. 2007, 9, 1730-1734.
17. Rabaey, K.; Ossieur, W.; Verhaege, M.; Verstraete W. Continuous microbial fuel cells convert carbohydrates to electricity. *Water Sci. Technol.* 2005, 52, 515-523.
18. Rodrigo, M.A.; Cañizares, P.; Lobato, J.; Paz, R.; Sáez, C.; Linares, J.J. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *J. of Power Sources*. 2007, 169, 198-204.
19. Shimoyama, T.; Komukai, S.; Yamazawa, A.; Ueno, Y.; Logan, B.E.; Watanabe, K. Electricity generation from model organic wastewater in a cassette-electrode microbial fuel cell. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2008, 80, 325-330.
20. Shizas, I.; Bangle, D.M.; Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams. *J. Energy Engin.* 2004, 130(2), 45-53.
21. Trapero Arenas, J.R.; García Márquez, F.P.; Pedregal Tercero, D.J. Dirección y Gestión Empresarial. *McGraw-Hill Education*, Madrid. 2013. ISBN: 978-84-481-9038-5.