



MBR anaerobio con membranas cerámicas para el tratamiento de las aguas residuales industriales complejas

Elena Meabe doctora ingeniera química, responsable de Procesos e Ingeniería de Likuid Nanotek
Antonio Sempere ingeniero industrial, *area manager* Europa de Likuid Nanotek

El biorreactor de membranas anaerobio (AnMBR) es una tecnología innovadora que combina la digestión anaerobia y la filtración con membranas para la separación de la biomasa y el efluente. El AnMBR reúne las ventajas de los tratamientos anaerobios y la tecnología MBR en una solución compacta y robusta, caracterizada por la elevada eficiencia de eliminación de la DQO y la alta calidad del efluente. La incorporación de las membranas cerámicas altamente hidrofílicas permite superar las limitaciones relacionadas con el ensuciamiento, ya que se trata de membranas con menor tendencia al ensuciamiento, mayor rendimiento hidráulico y elevada resistencia mecánica, química y térmica, especialmente indicadas para el tratamiento de aguas industriales complejas. En este artículo se analiza en profundidad la aplicación del sistema AnCMBR desde una perspectiva técnico-económica y se presentan los principales resultados de un proyecto de I+D relacionado con el estudio de dicha tecnología.

Palabras clave

Biorreactor de membranas (MBR), membrana cerámica, digestión anaerobia, aguas residuales industriales.

Anaerobic MBR with ceramic membranes for industrial wastewater treatment

The anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) is a highly innovative technology which combines anaerobic digestion and membrane filtration to provide complete solid-liquid separation. The AnMBR offers the advantages of both the anaerobic process and the MBR technology in a very robust and compact solution, characterized by the higher COD removal efficiency and the excellent effluent quality. The use of highly hydrophilic ceramic membranes allows overcoming the fouling issues, since they are less prone to fouling and possess higher mechanical, chemical and thermal resistance. In this article, the application of the AnCMBR system is thoroughly analyzed from a techno-economical perspective and the main results of a R&D project related to this technology are presented.

Keywords

Membrane bioreactor (MBR), ceramic membrane, anaerobic digestion, industrial wastewater.



1. Introducción

La filtración con membranas es actualmente una tecnología consolidada para el tratamiento de las aguas residuales industriales. El proceso conocido como biorreactor de membranas (MBR o BRM) está ganando importancia debido a las ventajas que presenta respecto al proceso de fangos activos convencional: mediante la sustitución de los decantadores convencionales por las membranas para retener la biomasa en el interior del reactor se consigue obtener un efluente de gran calidad apto para la reutilización, además de permitir la operación con elevada concentración de biomasa en el reactor biológico de forma que los requerimientos de espacio se reducen de forma importante.

En los últimos años ha tomado importancia una variante del proceso en el cual la filtración con membranas se acopla a un digestor anaerobio: el biorreactor de membranas anaerobio (AnMBR). La digestión anaerobia ofrece una serie de ventajas importantes sobre los procesos aerobios. En primer lugar, no se requiere aporte de oxígeno, de forma que se eliminan las dificultades técnicas, el coste y la energía necesarios para la disolución del oxígeno en el sistema. En segundo lugar, se produce metano, que sirve como una fuente de energía renovable.

Así mismo, la digestión anaerobia presenta ciertas limitaciones o desventajas que han limitado su aplicación más generalizada para el tratamiento de aguas residuales, tales como la menor eficiencia de depuración, la peor calidad del efluente y la mayor inestabilidad del proceso. La tecnología AnMBR permite superar estas limitaciones, ya que combina las ventajas del proceso anaerobio y la tecnología MBR en una solución muy robusta y compacta, caracte-

Likuid ha desarrollado una nueva generación de membranas cerámicas altamente hidrofílicas concebidas para el empleo en la serie AnCBR. Son sistemas externos de filtración cerámica diseñados para acoplarse a un digestor anaerobio de mezcla perfecta y que permiten obtener un efluente de alta calidad con un elevado rendimiento de la filtración

rizada por la mayor eficiencia en términos de eliminación de materia orgánica, la mayor generación de biogás y la excelente calidad del efluente, que está totalmente libre de sólidos y material coloidal, lo que reduce o incluso elimina las necesidades de postratamiento de afine y los costes asociados.

Además, dado que no se requiere la granulación del fango anaerobio, es posible tratar aguas residuales complejas. Es precisamente en esta tipología de aguas residuales donde las tecnologías anaerobias de alta carga más extendidas (UASB, EGSB, IC) no son adecuadas y, por lo tanto, este es el campo en el que la aplicación de la tecnología AnMBR es más competitiva.

Por último, debe destacarse que el ensuciamiento de las membranas es uno de los factores que han limitado la expansión de la tecnología, debido a que el rendimiento de la filtración es peor que en los sistemas MBR aerobios. En este escenario, el empleo de las membranas cerámicas presenta un elevado potencial, ya que el material cerámico se caracteriza por su elevada hidrofiliidad, resultando en un mayor rendimiento y un menor ensuciamiento. Además, la elevada resistencia química y térmica permite aplicar limpiezas de mantenimiento agresivas para regenerar las membranas y alargar su vida útil.

2. Campo de aplicación de la tecnología

El tratamiento anaerobio de alta carga para aguas industriales se encuentra consolidado debido a las importantes ventajas citadas anteriormente: generación de energía, eliminación de elevadas cantidades de carga orgánica y menor producción de fangos en exceso. El éxito de estos procesos depende principalmente de la retención de las bacterias metanogénicas de lento crecimiento en el interior del reactor, es decir, de que el tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulico se desacoplen de forma eficiente. La retención de la biomasa se consigue en los procesos convencionales mediante tres mecanismos: la decantación, la soportación y la granulación.

Este último mecanismo es el que se aplica de forma mayoritaria, como queda reflejado en el número de instalaciones con tecnología UASB, EGSB o IC. La granulación, definida como la formación de agregados microbianos con buena decantabilidad, depende de diferentes factores tales como las condiciones hidrodinámicas, las características del agua residual, los parámetros fisicoquímicos, etc. Además, la adecuada granulación está asociada a unos determinados mecanismos de selección bacteriana. Por este motivo, existe una serie de circunstancias que influyen negativamente y limi-

tan la aplicación de las tecnologías basadas en fango granular. La **Tabla 1** resume las posibles condiciones extremas que pueden presentarse en las aguas residuales industriales, que impiden o dificultan la granulación, y las ventajas asociadas al empleo de la tecnología AnMBR.

En las circunstancias resumidas en la **Tabla 1**, la novedosa tecnología AnMBR se presenta como una de las escasas alternativas que permiten la separación efectiva de la biomasa y el efluente. Además de conseguir una elevada calidad del efluente, aumenta la generación de biogás debido a la retención total de los sólidos por las membranas, lo que hace que las grandes macromoléculas orgánicas permanezcan en el interior del

digestor hasta que se hidrolicen. Además, las membranas retienen especies bacterianas capaces de degradar contaminantes específicos presentes en el agua residual.

Debe destacarse que la tipología de aguas residuales identificadas en la **Tabla 1** será cada vez más frecuente en los entornos industriales debido a los procesos productivos más limpios en los que se disminuye el consumo de agua y se impulsa la reutilización [2]. En este escenario, Likuid ha desarrollado una nueva generación de membranas cerámicas altamente hidrofílicas concebidas para el empleo en la serie AnC-BR (*anaerobic ceramic membrane bioreactor*): sistemas externos de filtración cerámica específicamente

diseñados para ser acoplados a un digestor anaerobio de mezcla perfecta que permiten la obtención de un efluente de alta calidad con un elevado rendimiento de la filtración. El empleo de las membranas cerámicas conlleva las siguientes ventajas:

- Membranas altamente hidrofílicas, que maximizan el rendimiento de la filtración, con flujos significativamente mayores que los obtenidos con membranas poliméricas.
- Soluciones modulares, que aportan flexibilidad.
- Membranas accesibles, que facilitan las operaciones de mantenimiento.
- Sistemas compactos, por el elevado rendimiento de la filtración.

Tabla 1. Ventajas de la tecnología AnMBR para mitigar las limitaciones en el tratamiento anaerobio de aguas complejas (adaptación de [1]).

Condiciones	Efectos en el proceso anaerobio	Ventajas AnMBR
Elevados SS	<ul style="list-style-type: none"> - Granulación poco eficiente - Baja calidad del efluente por SS - Acumulación de compuestos lentamente biodegradables en el lecho y menor eficiencia de producción de biogás - Dificultad en sistemas de distribución del influente en los reactores de lecho granular - <i>Clogging</i> de biofiltros anaerobios 	<ul style="list-style-type: none"> - La retención de la biomasa no depende de la granulación - Efluente libre de SS - Se elimina pretratamiento para eliminar SS y aumenta la producción de biogás - No son necesarios sistemas complejos de distribución del influente porque se emplean reactores de mezcla completa
Elevadas A&G	<ul style="list-style-type: none"> - Se impide la granulación - Flotación y lavado de la biomasa anaerobia 	<ul style="list-style-type: none"> - La biomasa en suspensión es retenida por las membranas - No hay pérdida de biomasa ni deterioro de la calidad del efluente
Elevada salinidad	<ul style="list-style-type: none"> - Impacto negativo en la estabilidad de los gránulos - Elevados tiempos de adaptación (arranque lento) - Menor actividad biológica 	<ul style="list-style-type: none"> - La biomasa permanece en el interior del reactor, independientemente de sus propiedades de decantación/granulación - Mejor adaptación a las condiciones de salinidad - Arranques más rápidos
Compuestos tóxicos	<ul style="list-style-type: none"> - Posibles problemas de granulación y pérdida de biomasa - Elevados tiempos de aclimatación para que aparezcan especies capaces de degradar los tóxicos - Inhibición de la metanogénesis, especialmente en los sistemas estratificados 	<ul style="list-style-type: none"> - No hay lavado de biomasa - La biomasa permanece en el interior del reactor, independientemente de sus propiedades de decantación/granulación - Mejor dilución bajo un shock tóxico en el reactor de mezcla completa, respecto a sistemas estratificados. - La bioaumentación de bacterias especializadas es más sencilla
Elevada T	<ul style="list-style-type: none"> - Se dificulta la granulación del fango 	<ul style="list-style-type: none"> - La retención de la biomasa no depende de la granulación



- Membranas resistentes, que soportan limpiezas químicas agresivas.
- Sistemas robustos, que se adaptan a variaciones y aportan fiabilidad.
- Proceso estable, con bajos requerimientos de mantenimiento (frecuencia de limpieza química 2-3 meses).

Los sistemas de filtración Likuid-AnCBB surgen a partir de una intensa actividad de I+D+i durante los últimos 4 años, en los que se ha trabajado en estudios de laboratorio, escala piloto y escala semi-industrial. Cabe destacar el proyecto FILENE, apoyado por el Programa INNPACTO del Ministerio de Ciencia e Innovación, en el que se ha trabajado junto con FCC Aqualia y la Universidad Complutense de Madrid. En dicho proyecto se ha estudiado la aplicación de la tecnología MBR anaerobio con membranas cerámicas en la industria alimentaria, para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la cocción de maíz para fabricación de *snacks*. En el apartado siguiente se presentan los principales resultados de dicho estudio.

3. Estudio del AnCBB a escala de laboratorio y semi-industrial para el tratamiento de aguas residuales de alta carga en la industria alimentaria

3.1. Introducción y objetivos

Las aguas residuales generadas en la cocción de maíz para fabricación de *snacks* se caracterizan por el elevado contenido de materia orgánica (DQO = 35 g/L) y sólidos en suspensión (SST = 14 g/L). En este escenario se dan las circunstancias que favorecen la viabilidad técnico-económica de la tecnología AnCBB. El trabajo experimental realizado se ha centrado en un estudio a escala

Figura 1. Imágenes de los dispositivos experimentales: AnCBB de laboratorio (a la izquierda) y planta semi-industrial (a la derecha).



de laboratorio y semi-industrial con el objetivo de analizar el rendimiento de la digestión, la calidad del efluente, el rendimiento de la filtración y la producción de biogás.

3.2. Materiales y métodos

Los dispositivos experimentales AnCBB consisten en un digestor de mezcla completa, al que se acopla un sistema de filtración externo, con membranas cerámicas Likuid especialmente desarrolladas para la filtración de biomasa anaerobia. Los digestores disponen de sistemas de regulación de la temperatura para operar en condiciones mesófilas (35 °C). Además, ambos sistemas se han operado con concentraciones medias de MLSS de 20 g/L. En la **Figura 1** se muestran los dispositivos experimentales empleados.

El sistema AnCBB de laboratorio consiste en un digestor de 12 L de volumen útil y una membrana cerámica tubular con una superficie filtrante de 220 cm². Se ha estudiado el proceso con agua residual sintética, formulada para reproducir lo más fielmente posible el agua residual generada en la cocción de maíz. En la última parte del estudio se ha sustituido el agua residual sintética por agua residual real, con el objetivo de comparar el rendimiento

en ambas circunstancias. La **Tabla 2** resume la composición de ambas corrientes de alimentación.

El sistema AnCBB semi-industrial es un digestor anaerobio con un volumen de 2,5 m³ y un sistema de filtración que consiste en cuatro módulos Likuid-L07 (superficie filtrante total de 6,8 m²). El sistema semi-industrial se ha ubicado en la planta de producción de *snacks*.

3.3. Principales resultados y discusión

El estudio del proceso AnCBB en la planta de laboratorio ha permitido analizar el rendimiento de la digestión anaerobia en condiciones controladas mediante el tratamiento de agua residual sintética, formulada en base a la composición elemental del maíz considerando un 75% de almidón, 10% de proteína y 4,3% de grasa. En la planta de laboratorio, la carga orgánica volumétrica (COV) se ha aumentado de forma gradual desde 0,7 hasta 7 kgDQO/(m³·d), manteniendo la eficiencia de eliminación de DQO y COT entre el 95 y 99% y obteniendo un permeado de elevada calidad, libre de sólidos en suspensión y turbidez. La producción de biogás ha aumentado proporcionalmente a la COV, obteniéndose un biogás con un 60%

Tabla 2. Caracterización del agua residual alimentada: agua residual sintética (valores para DQO = 10 g/L) y agua residual generada en la cocción del maíz.

Agua residual sintética			Agua residual de cocción de maíz	
Compuesto		Concentración (g/L)	Parámetro	Valor
Materia orgánica	Almidón soluble	7,5	pH (unidades de pH)	4,1
	Peptona de carne	1	Conductividad (mS/cm)	3,17
	Levadura	0.357	Sólidos totales (g/L)	30,2
	Acetato de sodio	1,183	Sólidos volátiles (g/L)	27,3
	Aceite de soja	0,43	Sólidos suspendidos totales (g/L)	14,5
Macronutrientes	NH ₄ Cl	0,291	Sólidos suspendidos volátiles (g/L)	13,8
	MgHPO ₄ ·3H ₂ O	0,66	DQO total (g/L)	35,1
	KH ₂ PO ₄	0,532	DQO soluble (g/L)	24,4
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,132	COT (g/L)	11,4
	CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,477	PO ₄ ⁻² (mg/L)	11
Micronutrientes	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0,002	SO ₄ ⁻² (mg/L)	182
	Cr(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	0,018	N Total (mg/L)	49,6
	CuCl ₂ ·2H ₂ O	0,012	N-NH ₄ (mg/L)	32,6
	MnSO ₄ ·H ₂ O	0,002		
	NiSO ₄ ·6H ₂ O	0,008		
	PbCl ₂	0,002		
	ZnCl ₂	0,005		

de metano y resultando en una producción específica media de 0,34 Nm³CH₄/kgDQO_{elim}. En una segunda etapa experimental se ha tratado el agua residual real procedente de la cocción de maíz, con el objetivo de comparar el rendimiento en ambos casos. Se ha comprobado que el rendimiento empeora ligeramente cuando se trata agua real, observándose que la eficiencia de eliminación de DQO y COT se reduce hasta un 90%, lo que se asocia a cierta acumulación de ácido propiónico en el sistema (**Figura 2**).

En la planta semi-industrial se ha operado con eliminaciones de DQO superiores al 96% (DQO influente y permeado de 30.000 mg/L y 1.000

mg/L, respectivamente) manteniendo la COV por debajo de 3 kgDQO/(m³·d). Sin embargo, por encima de estos valores la eliminación de DQO media se ha mantenido en el 84%, lo que está relacionado de nuevo con la aparición de ácido propiónico en el digestor.

En lo relativo a la etapa de ultrafiltración cerámica, se ha operado con velocidades de flujo cruzado en el rango de 2-3 m/s, obteniéndose flujos de permeado de 40 L/hm² con presión transmembrana media de 0,5 bar, lo que resulta en una permeabilidad de 80 L/hm²bar. Respecto al ensuciamiento irreversible de las membranas, que constituye actualmente uno de los frenos

a la implantación de la tecnología AnMBR, debe mencionarse que en el presente estudio se han aplicado limpiezas químicas cada 2-3 meses, combinando etapas de lavado alcalino y ácido, que han resultado en una regeneración de las membranas cerámicas muy satisfactoria.

En dichas limpiezas, la fase de lavado ácido ha jugado un papel importante en la recuperación de la permeabilidad con agua limpia, lo que está relacionado con la generación de ensuciamiento de naturaleza inorgánica. Se confirma así la información bibliográfica referente a la mayor susceptibilidad de los sistemas anaerobios al ensuciamiento inorgánico, debido a las variaciones



Figura 2. Evolución de la carga orgánica, eliminación de DQO y ácidos grasos volátiles, con alimentación de agua sintética y agua residual real.

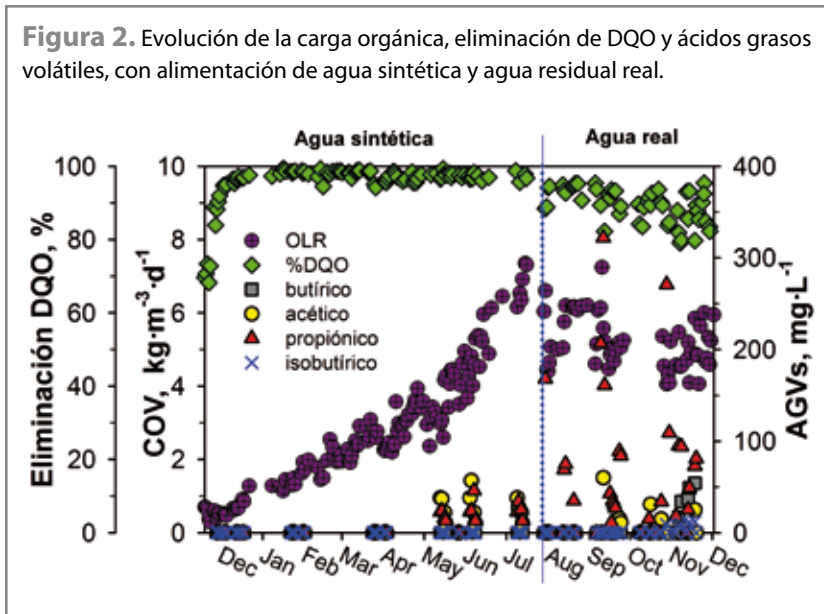
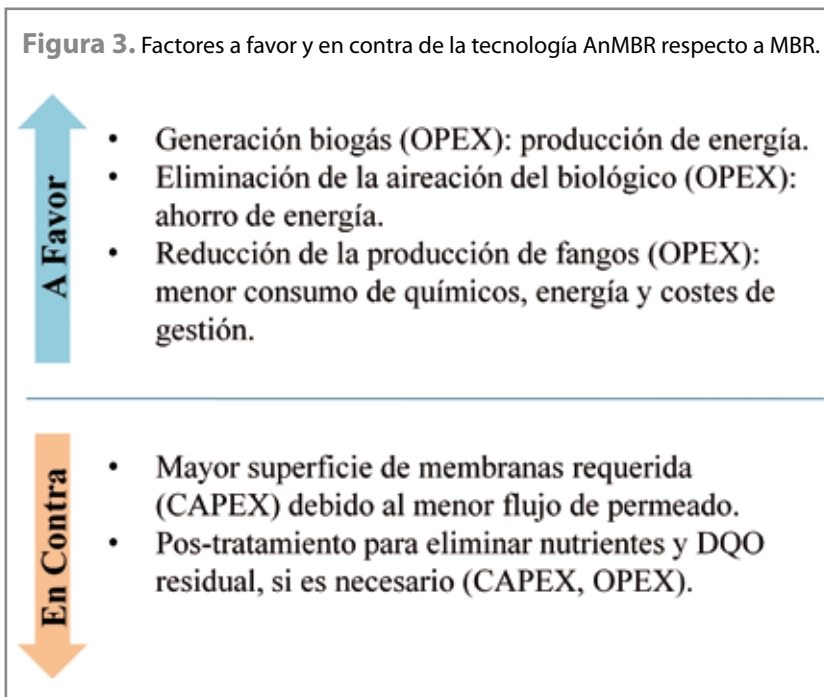


Figura 3. Factores a favor y en contra de la tecnología AnMBR respecto a MBR.



de pH por los cambios en las presiones parciales del CO₂ y a la producción de concentraciones elevadas de amonio y fosfatos [3].

4. Viabilidad y conclusiones

El AnMBR se presenta como una tecnología innovadora, que se encuentra actualmente en fase de implantación a escala industrial con un número de referencias limitado a nivel mundial, si bien está desper-

tando un creciente interés tanto en la comunidad científica como en el ámbito industrial. Este hecho surge como consecuencia de las importantes ventajas citadas anteriormente, pero también de la existencia de una tipología de aguas residuales cuyo tratamiento mediante las tecnologías anaerobias convencionales conlleva dificultades.

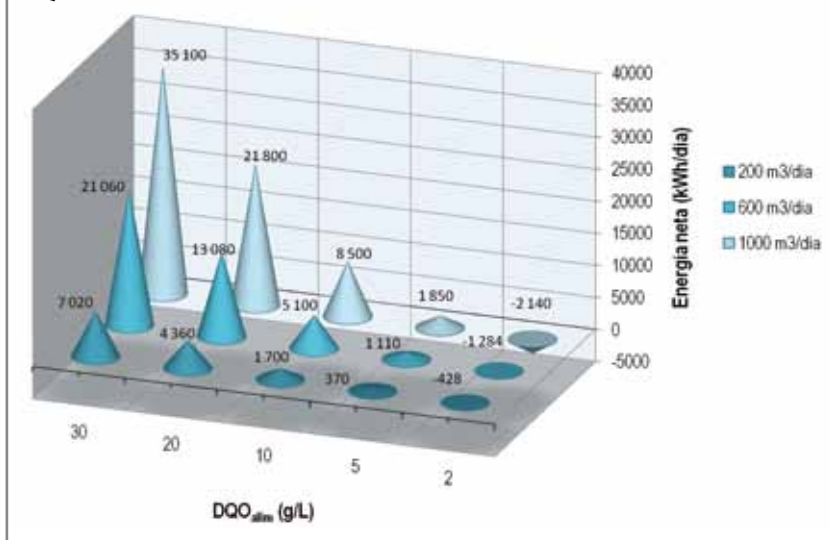
En lo relativo a la comparativa de la tecnología AnMBR respecto a su

homólogo aerobio, cabe destacar los siguientes elementos que actúan en favor o en contra de su aplicación (Figura 3). Las ventajas del AnMBR están asociadas mayoritariamente al OPEX, mientras que el factor contrario tiene que ver con el CAPEX debido a la mayor superficie de membranas que debe instalarse. El factor que desequilibra la balanza hacia uno u otro lado tiene que ver con el ahorro que supone el AnMBR en términos de OPEX y el tiempo de amortización resultante. Para determinado valor de carga volumétrica (kgDQO/m³·día) –que surge del producto del caudal volumétrico y la concentración de DQO– el flujo de permeado es independiente de la DQO del agua residual. Por lo tanto, el AnMBR es más viable cuanto mayor carga orgánica presentan las aguas a tratar. De esta forma, para un mismo caudal tratado se maximiza la energía generada en forma de biogás y el ahorro debido a la eliminación de la aireación y la menor generación de fangos, dado que todos los elementos anteriores dependen exclusivamente de la DQO.

En la Figura 4 se ha representado la generación neta de energía para un sistema Likuid-AnCMBR en el que se tratan diferentes caudales (200, 600 y 1.000 m³/día) con diferentes concentraciones de materia orgánica (DQO entre 2 y 30 g/L). Para la estimación de la producción de biogás se ha considerado:

- Eficiencia de eliminación de DQO: 95%.
- Generación específica de metano: 0,35 Nm³CH₄/kgDQO_{elim}.
- Concentración de metano en el biogás: 65%.
- Energía teórica del biogás: 6,5 kWh/Nm³.
- Eficiencia de transformación en energía eléctrica: 40%.

Figura 4. Generación neta de energía en un proceso AnMBR basado en el sistema Likuid-AnCBR para tres niveles de caudal tratado y diferentes DQO de la alimentación.



Tal como se muestra en la **Figura 4**, para una DQO de 5 g/L se obtiene una energía neta positiva, es decir, la energía eléctrica asociada al biogás producido supera la energía necesaria para llevar a cabo la filtración. En consecuencia, cualquier agua residual industrial con DQO por encima de este valor podrá ser tratado en un sistema Likuid-AnCBR sin requerir aporte de energía. Así mismo, debe señalarse que el uso del biogás como fuente de energía renovable en ocasiones solo es viable económicamente cuando se supera cierta producción. Por ejemplo, los motores de cogeneración convencionales sólo son rentables en plantas con generaciones superiores a 500 kW, lo que en la práctica se traduce en caudales de biogás en torno a 200 Nm³/h. En este campo han aparecido avances interesantes tales como las microturbinas, que presentan un rango de potencia eléctrica entre 30 y 200 kW y presentan ventajas tales como la modularidad, la posibilidad de operar con bajas concentraciones de metano en el biogás (35%) y la elevada tolerancia al ácido sulfhídrico en el biogás (5.000 ppm o incluso

valores mayores) [4]. Como desventaja, debe mencionarse la menor eficiencia en la transformación a energía eléctrica (en torno al 30%). En este escenario, el tratamiento de un caudal de 200 m³/día con una DQO de 20 g/L podría alimentar una instalación de microturbinas con una potencia total de 180 kWe.

Como conclusión, la tecnología Likuid-AnCBR presenta el mayor interés en lo relativo a la viabilidad técnico-económica cuando se dan uno o varios de los factores citados a continuación:

- Aguas residuales industriales de alta carga (DQO > 5.000 mg/L), especialmente cuando presentan elevadas concentraciones de sólidos en suspensión, aceites y grasas o salinidad. Entre los sectores industriales con aguas de esta tipología se encuentran la industria alimentaria y de bebidas, los mataderos, el tratamiento de purines o la gestión de fangos de depuradora.
- Caudales bajos o medios (hasta 2.000 m³/día), lo que se aplica de forma general a cualquier tecnología de filtración tangencial externa.

- Elevados requerimientos de calidad del efluente, para vertido, reutilización o postratamiento mediante ósmosis inversa.

- No necesidad de eliminación de nutrientes, evitando así el postratamiento y potenciando las ventajas de la elevada calidad del efluente (ausencia de sólidos en suspensión y turbidez menor de 1 NTU).

- Necesidad de un sistema robusto, compacto, de fácil operación y mantenimiento y elevada eficiencia.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a los participantes en el proyecto FILENE, cuya colaboración ha sido imprescindible para el desarrollo del trabajo experimental del caso de estudio aquí presentado. A FCC Aqualia, especialmente a Jose Ramón Santiago y Frank Rogalla. A la Universidad Complutense de Madrid (Departamento de Ingeniería Química), especialmente a Luis Cortijo, Helen Barndok, Carlos Negro, Patricio López y Daphne Hermosilla. Asimismo, los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación del proyecto FILENE (IPT-420000-2010-13). Por último, a Alex Marshall (Clarke Energy) por la cesión de parte del material fotográfico utilizado.

Bibliografía

- [1] Dereli, R.K.; Ersahina, M.E.; Ozguna, H.; Ozturk, I.; Jeison, D.; van der Zee, F.; van Lier, J.B. (2012). Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters. *Bioresource Technology*, núm. 122, págs. 160-170.
- [2] van Lier, J.B. (2008). High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. *Water Science and Technology*, núm. 57(8), págs. 1.137-1.148.
- [3] Liao, B.Q.; Kraemer, J.T.; Bagley, D.M. (2006). Anaerobic membrane bioreactors: Applications and research directions. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, núm. 36(6), págs. 489-530.
- [4] Hurley, C. (2003). Biogas-fuelled microturbinas. *Cogeneration & On-Site Power Production*, November-December, págs. 31-40.