

# El biorreactor anaerobio de membranas (AnMBR): alternativa tecnológica para establecer las bases de la EDAR del siglo XXI

A. Bouzas<sup>1</sup>, A. Robles<sup>2</sup>, M.V. Ruano<sup>1</sup>, J. González-Camejo<sup>2</sup>, A. Jiménez-Benítez<sup>2</sup>, O. Mateo<sup>2</sup>, P. Moñino<sup>2</sup>, R. Pretel<sup>2</sup>, A. Viruela<sup>2</sup>, S. Greses<sup>1</sup>, R. Serna<sup>1</sup>, F. Durán<sup>2</sup>, A. Ruíz-Martínez<sup>2</sup>, M.R. Abargues<sup>1</sup>, M. Pachés<sup>2</sup>, J.F. Mora<sup>1</sup>, J.B. Giménez<sup>2</sup>, D. Aguado<sup>2</sup>, R. Barat<sup>2</sup>, J. Serralta<sup>2</sup>, L. Borrás<sup>1</sup>, N. Martí<sup>1</sup>, J. Ribes<sup>1</sup>, J. Ferrer<sup>2</sup> y A. Seco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departament d'Enginyeria Química. Universitat de València. Avinguda de la Universitat, s/n. 46100 – Burjassot. Valencia.

<sup>2</sup> Institut Universitari d'Investigació d'Enginyeria de l'Aigua i Medi Ambient (IIAMA). Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022 – Valencia. Valencia.

\*alberto.bouzas@uv.es

## Resumen

En el presente trabajo se describe la actual línea central de trabajo del grupo de investigación CALAGUA, formado por personal del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València y del Dpto. de Ingeniería Química de la Universitat de València. El objetivo principal de esta línea de investigación es evaluar la viabilidad técnica, económica y medioambiental de la tecnología de biorreactores anaerobios de membranas (AnMBR) como candidata para establecer las bases de la EDAR del siglo XXI; permitiendo transformar las actuales EDAR (wastewater treatment plant, WWTP) en instalaciones para la recuperación de los recursos del agua residual (water resource recovery facility, WRRF). Los principales aspectos a considerar son la el potencial de recuperación de energía y nutrientes, la calidad del efluente generado y la baja cantidad de fangos producidos, siendo todos ellos de vital importancia cuando se evalúa el impacto medioambiental de una EDAR urbana.

En este trabajo se describen los objetivos y resultados obtenidos en los proyectos actualmente en marcha, cuyo objetivo general es evaluar la viabilidad de diferentes esquemas de tratamiento del agua residual urbana basados en la tecnología AnMBR. Entre otros procesos, los esquemas de tratamiento propuestos combinan: decantación primaria, reactores AnMBR, eliminación de nutrientes mediante fangos activados, reactores de membrana aerobios y cultivos de microalgas, recuperación de nutrientes mediante procesos de cristalización de estruvita, digestión anaerobia de los rechazos producidos, etc. Para obtener resultados representativos que puedan ser extrapolados a plantas reales, este trabajo se basa principalmente en los resultados obtenidos en diferentes plantas a escala piloto y semi-industrial operadas por el grupo de investigación.

**Palabras Clave:** Agua residual urbana; biorreactor anaerobio de membranas (AnMBR); cultivo de microalgas; estruvita; recuperación de recursos.

## Introducción

El grupo de investigación CALAGUA (formado por personal del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, de la Universidad Politècnica de Valencia (IIAMA-UPV) y del Dpto. de Ingeniería Química de la Universitat de València, (DIQ-UV)) viene trabajando durante más de dos décadas en el estudio integral de todos los procesos biológicos y físico/químicos que tienen lugar en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Actualmente, se centra en el desarrollo de esquemas viables que permitan el tratamiento sostenible del agua residual urbana utilizando biorreactores anaerobios con membranas (AnMBR) como núcleo del esquema de tratamiento (Giménez *et al.*, 2011; Ribes *et al.*, 2013). La baja carga de este tipo de aguas se compensa con el bajo TRH al cual es posible operar el reactor anaerobio con la ayuda del sistema de separación por membranas, que retiene totalmente la biomasa, pudiéndose alcanzar tiempos de retención celular (TRC) elevados que permiten la eliminación anaerobia de materia orgánica incluso a temperaturas bajas (Giménez *et al.*, 2012a; 2014).

La filtración mediante membranas de ultrafiltración permite alcanzar flujos netos transmembrana del mismo orden que en los sistemas de membranas aerobias, con una menor necesidad de limpieza química (Robles *et al.*, 2012a; 2012b; 2013).

La presencia de metano disuelto en el efluente es uno de los grandes retos a solucionar antes de la implantación masiva a escala industrial de la tecnología AnMBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas (Giménez *et al.*, 2012b). Así pues, con el objetivo de demostrar las ventajas que ofrece la tecnología AnMBR para la recuperación de recursos y energía del agua residual urbana y comprobar la viabilidad técnica de la recuperación del metano disuelto en el efluente, la CE financia, bajo el Programa LIFE+, el proyecto titulado “Membrane for Energy and Water Recovery” (LIFE MEMORY), liderado por la empresa FCC Aqualia en el que participan el grupo CALAGUA y la empresa Koch Membrane Systems.

La elevada calidad del efluente obtenido con la tecnología AnMBR (libre de sólidos suspendidos y patógenos), permitiría su uso directo sobre el terreno para aportar nutrientes ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ) a los cultivos, previa eliminación de los gases disueltos (i.e.  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ). Sin embargo, debido a que en la actualidad la legislación no permite realizar esta práctica, se debe recurrir a la combinación de distintas tecnologías que permitan eliminar los nutrientes presentes en el efluente de un AnMBR. En este sentido, Ruiz-Martínez *et al.* (2012) demostraron la viabilidad de utilizar un cultivo de microalgas para recuperar estos nutrientes. La separación efectiva de la biomasa algal del agua es un desafío clave en la aplicación de los cultivos de microalgas al tratamiento del ARU, ya que los requisitos energéticos para el cultivo y la separación podrían llegar a exceder el contenido energético de la propia biomasa (Greenwell *et al.*, 2010; Uduman *et al.*, 2010). Para ello, el grupo CALAGUA propone el uso de la tecnología de membranas acoplada a un fotobioreactor (tecnología MPBR). Un aspecto clave para reducir los costes de la tecnología MPBR consiste en maximizar la recuperación de energía a partir de la biomasa algal generada. Una alternativa interesante para maximizar la recuperación energética del ARU es la combinación de la decantación primaria con un reactor AnMBR y un fotobiorreactor, y la digestión conjunta de los fangos producidos (primario y AnMBR) con la biomasa algal proveniente del sistema MPBR tras un adecuado acondicionamiento (concentración y pretratamiento).

Tras el proceso de digestión de las algas es posible recuperar los nutrientes en forma de productos comerciales. La forma más ampliamente extendida para la recuperación del fósforo es como estruvita ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), ampliamente estudiada por el grupo de investigación CALAGUA. Este producto presenta ventajas sobre los fertilizantes estándar (Münch & Barr, 2001). El nitrógeno amoniacal en exceso puede ser también recuperado mediante un proceso de desabsorción con aire y posterior absorción en ácido sulfúrico, para obtener sulfato amónico, el cual podría ser utilizado en la producción de fertilizantes. Por otra parte, el fango deshidratado podría ser utilizado como enmienda orgánica debido a que presenta cualidades adecuadas para su utilización agronómica (presencia de nitrógeno y fósforo), previa estabilización biológica mediante compostaje. Por tanto, con la combinación de tecnologías anaerobias con sistemas de cultivo de microalgas se pretende configurar un sistema completo de tratamiento del ARU que maximice las posibilidades de recuperación de recursos y energía.

En la actualidad, el grupo de investigación Calagua recibe financiación del Plan Nacional de I+D+i, mediante el proyecto BIONUTEN para el estudio conjunto de la combinación de la decantación primaria, las tecnologías AnMBR y MPBR, la digestión anaerobia de fangos y microalgas, y la recuperación de nutrientes en forma de productos comerciales. Engloba el uso de tecnologías clásicas y novedosas en la búsqueda de una solución para el tratamiento del ARU dirigida principalmente al aprovechamiento de recursos (energía y nutrientes), lo que supone un paso más en el cambio de paradigma en el campo de la depuración del ARU hacia un tratamiento sostenible que resulte beneficioso desde un punto de vista económico, social y ambiental.

## Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es presentar los resultados obtenidos hasta el momento en los dos proyectos anteriormente mencionados, orientados a evaluar la viabilidad de diferentes esquemas de tratamiento del agua residual urbana basados en la tecnología AnMBR. Los objetivos fundamentales de cada uno de estos proyectos se detallan a continuación:

Proyecto LIFE MEMORY:

- Reducción del consumo energético de las EDAR en un 70 %: El proyecto LIFE MEMORY, tras ser validado, debería ofrecer una solución a la reducción de la huella de carbono, dado que la reutilización del biogás generado reduce las necesidades energéticas netas del proceso.
- Reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero por unidad de DQO eliminada del 80 %: El proyecto supondrá una contribución positiva al problema de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la reducción del consumo energético, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la mejora en la huella de carbono de la propia tecnología.
- Incremento de la calidad del efluente y reducción de la producción de residuos en un 50 %: La elevada capacidad de retención de las membranas deberían proporcionar un efluente libre de sólidos suspendidos y patógenos. Por otra parte, el menor rendimiento celular de los organismos anaerobios, en comparación con los organismos que llevan a cabo la respiración celular, debería dar lugar a una menor producción de fangos.

Proyecto BIONUTEN:

- Optimizar el sistema de tratamiento del agua residual urbana basado en las tecnologías de proceso de tratamiento anaerobio con membranas tras decantación primaria y cultivo de microalgas para maximizar la producción de energía y la obtención de una corriente con elevadas concentraciones de nutrientes.
- Estudiar la recuperación de recursos en forma de productos comerciales a partir de las corrientes obtenidas con el esquema de tratamiento propuesto.
- Estudiar las comunidades de microorganismos presentes en los diferentes sistemas a nivel microbiológico.
- Analizar la degradación de sustancias prioritarias y emergentes en los distintos procesos de tratamiento.
- Desarrollar un sistema de soporte a la decisión para seleccionar el esquema de tratamiento más adecuado en función de las características del agua a tratar (nutrientes, materia orgánica, sulfatos, etc...) y de las condiciones ambientales.

## Materiales y métodos

Las plantas de tratamiento a escala demostración y piloto mencionadas en la introducción se describen a continuación:

### ***Planta AnMBR para el proyecto LIFE MEMORY***

La planta AnMBR perteneciente al proyecto LIFE MEMORY se está construyendo en la actualidad (Figura 1a) y está compuesta de un reactor anaerobio con un volumen total de 42 m<sup>3</sup> (15% de espacio de cabeza), conectado a tres tanques de separación con un volumen total de 0.8 m<sup>3</sup>/tanque (15 % de espacio de cabeza en cada uno), dotados de módulos comerciales de membranas de ultrafiltración (PURON®, Koch Membrane Systems, PSH41 de 41 m<sup>2</sup> de superficie y 0.03 µm de tamaño de poro). La planta también incluye un tamiz de tornillo (chapa perforada de 1.5 mm de diámetro), un tanque de homogeneización (1 m<sup>3</sup>) y un tanque de almacenamiento de permeado (0.3 m<sup>3</sup>).

## Planta de digestión del proyecto BIONUTEN

La planta de digestión perteneciente al proyecto BIONUTEN también se está construyendo en la actualidad (Figura 1b). Esta planta consta de un digestor anaerobio con un volumen total de 1000 L (10 % de espacio de cabeza), conectado a un tanque de separación con un volumen de 1 L, dotado de un módulo de membranas de ultrafiltración (0,42 m<sup>2</sup> de superficie y 0.05 µm de tamaño de poro). La planta también incluye una cámara de mezcla (110 L), un tanque de purga (72 L) y un tanque de almacenamiento de permeado (42 L).



Figura 1. Planta AnMBR del proyecto LIFE MEMORY (a) y planta de digestión del proyecto BIONUTEN (b)

## Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida del Programa LIFE+ de la Comisión Europea para llevar a cabo el Proyecto LIFE MEMORY titulado “Membrane for Energy and Water Recovery” (LIFE13 ENV/ES/001353) y del Ministerio de Economía y Competitividad para llevar a cabo el proyecto titulado “Combinación de procesos anaerobios, cultivos de microalgas y tecnología de membranas para la obtención de bionutrientes y energía de las aguas residuales urbanas (BIONUTEN CTM2014-54980-C2)”.

## Referencias

1. J.B. Giménez, A. Robles, L. Carretero, F. Durán, M.V. Ruano, M.N. Gatti, J. Ribes, J. Ferrer, A. Seco (2011) Experimental study of the anaerobic urban wastewater treatment in a submerged hollow-fibre membrane bioreactor at pilot scale. *Bioresour. Technol.* 102(19), 8799–8806.
2. J.B. Giménez, L. Carretero, M.N. Gatti, N. Martí, L. Borrás, J. Ribes y A. Seco. (2012a) Reliable method for assessing the COD mass balance of a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) treating sulphate-rich municipal wastewater. *Water Science & Technology*. 66 (3), 494-502.
3. J.B. Giménez, N. Martí, J. Ferrer, A. Seco (2012b) Methane recovery efficiency in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SANMBR) treating sulphate-rich urban wastewater: Evaluation of methane losses with the effluent. *Bioresource Technology*. 118, 67-72.
4. J.B. Giménez, N. Martí, A. Robles, J. Ferrer, A. Seco (2014) Anaerobic treatment of urban wastewater in membrane bioreactors (MBRs): Evaluation of seasonal temperature variations. *Water Science and Technology*. 69(7), 1581-1588.
5. H. C., Greenwell, L.M.L., Laurens, R.J. Shields, R.W., Lovitt, K.J., Flynn (2010). Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of Royal Society Interface*, 7(46), 703–726.
6. E., Münch, K., Barr (2001). Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester side streams. *Water Research*, 35(1), 151-159.
7. A. Robles, F. Durán, M.V. Ruano, J. Ribes, J. Ferrer (2012a) Influence of total solids concentration on membrane permeability in a submerged hollow-fibre anaerobic membrane bioreactor. *Water Sci. Technol.* 66(2), 373-384.
8. A. Robles, M.V. Ruano, J. Ribes, J. Ferrer (2012b) Sub-critical long-term operation of industrial scale hollow-fibre membranes in a submerged anaerobic MBR (HF-SANMBR) system, *Separation and Purification Technology* 100, 88–96.
9. A. Robles, M. V. Ruano, J. Ribes, J. Ferrer (2013) Factors that affect the permeability of commercial hollow-fibre membranes in a submerged anaerobic MBR (HF-SANMBR) system. *Water Research* 47, 1277–1288.
10. Ruiz-Martínez, A., Martín García, N., Seco, A., and Ferrer, J. (2012). Microalgae cultivation in wastewater: Nutrient removal from anaerobic membrane bioreactor effluent. *Bioresource Technology*, 126, 247-253.
11. N., Uduman, Y., Qi, M.K., Danquah, G.M., Forde, A., Hoadley (2010). Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2, 012701.
12. A.J., Ward, D.M., Lewis, F.B., Green (2014). Anaerobic digestion of algae biomass: A review. *Algal Research*, 5, 204-214