



## Iniciativas para el aprovechamiento energético del biogás generado en EDAR

**Autor:** Marcos Martín González

**Institución:** Aguas de Murcia

**Otros autores:** Mar Castro García (Aquatec); Teresa R. Serna Box (Aquambiente);  
Alicia Gadea Gadea (Emuasa); Elisa Rodríguez Gómez (Aquambiente)

## Resumen

Hay una tendencia creciente en considerar las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) como sistemas de recuperación de recursos, en lugar de únicamente instalaciones para la prevención de emisión de contaminantes al medio ambiente. La recuperación de productos con valor añadido y de energía maximiza el potencial económico y medioambiental de las instalaciones, permitiendo reducir los costes de explotación.

Aguas de Murcia es la empresa mixta, de la cual el 51% pertenece al Ayuntamiento de Murcia y el 49% al Grupo Agbar, que gestiona el ciclo integral del agua en el municipio de Murcia. Desde el año 2004 ha desarrollado en la EDAR Murcia Este diversas iniciativas dirigidas a poner en valor el biogás generado durante la digestión anaerobia de los lodos.

De 2004 a 2006, Aguas de Murcia desarrolla el proyecto ABICEC con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica de un proceso integrado para lograr un uso sostenible del biogás generado en EDAR mediante la eliminación selectiva de compuestos no deseados. Para ello se construyó una planta piloto que incluye tres etapas sucesivas: (i) Lavado químico (ácido, oxidativo y básico), (ii) Enfriamiento y (iii) Adsorción gas-sólido.

De 2007 a 2010, en el marco del proyecto AMEB, se estudió la obtención de combustible para la automoción (BIOEDAR) a partir del biogás. A partir de la corriente de biogás limpio, se obtienen una corriente rica CH<sub>4</sub> y otra rica en CO<sub>2</sub>, mediante dos procesos diferentes: (1) absorción química con aminas y (2) absorción física mediante lavado con agua a alta presión (water scrubbing). La corriente rica en CH<sub>4</sub> se utiliza como combustible para vehículos y la corriente rica en CO<sub>2</sub> se bombea a la cámara de ajuste de pH del reactor biológico.

De 2007 a 2010, se desarrolló el proyecto SOSTAQUA en él que, a través de un convenio de colaboración con el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP), se sintetizó un catalizador específico que permite el reformado seco del biogás para la producción de hidrógeno.

Desde el 2009 al 2012, Aguas de Murcia ha participado en el proyecto BIOCELL con el objetivo de demostrar la viabilidad industrial de la producción de energía a partir de biogás en EDAR mediante pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) y de polímero sólido (PEMFC) y el desarrollo de herramientas adecuadas para su aplicación industrial.

En septiembre de 2012 se ha puesto en marcha una planta de cogeneración con una potencia eléctrica instalada de 1 MW y capacidad para quemar hasta 7.300 Nm<sup>3</sup> de biogás/día, cubriendo así el 100% de las necesidades de calor y generando más del 40% de la electricidad que se consume en la planta.

**Palabras clave:** Depuradoras; biogás; energía

## **INICIATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGAS GENERADO EN EDAR**

**Autores:** Marcos Martín, Mar Castro, Teresa R. Serna, Alicia Gadea, Elisa Rodríguez.

**PALABRAS CLAVE:** *Depuradoras, biogás, energía*

### **RESUMEN**

Hay una tendencia creciente en considerar las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) como sistemas de recuperación de recursos, en lugar de únicamente instalaciones para la prevención de emisión de contaminantes al medio ambiente. La recuperación de productos con valor añadido y de energía maximiza el potencial económico y medioambiental de las instalaciones, permitiendo reducir los costes de explotación.

Aguas de Murcia es la empresa mixta, participada en un 51% al Ayuntamiento de Murcia y el 49% por Hidrogea (Grupo Agbar), que gestiona el ciclo integral del agua en el municipio de Murcia. Desde el año 2004 ha desarrollado en la EDAR Murcia Este diversas iniciativas dirigidas a poner en valor el biogás generado durante la digestión anaerobia (DA) de los lodos.

De 2004 a 2006, Aguas de Murcia desarrolla el proyecto ABICEC con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica de un proceso integrado para lograr un uso sostenible del biogás generado en EDAR mediante la eliminación selectiva de compuestos no deseados. Para ello se construyó una planta piloto que incluye tres etapas sucesivas: (i) Lavado químico (ácido, oxidativo y básico), (ii) Enfriamiento y (iii) Adsorción gas-sólido.

De 2007 a 2010, en el marco del proyecto AMEB, se estudió la obtención de combustible para la automoción (BIOEDAR) a partir del biogás. A partir de la corriente de biogás limpio, se obtienen una corriente rica  $\text{CH}_4$  y otra rica en  $\text{CO}_2$ , mediante dos procesos diferentes: (1) absorción química con aminas y (2) absorción física mediante lavado con agua a alta presión (water scrubbing). La corriente rica en  $\text{CH}_4$  se utiliza como combustible para vehículos y la corriente rica en  $\text{CO}_2$  se bombea a la cámara de ajuste de pH del reactor biológico.

De 2007 a 2010, se desarrolló el proyecto SOSTAQUA en el que, a través de un convenio de colaboración con el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP), se sintetizó un catalizador específico que permite el reformado seco del biogás para la producción de hidrógeno.

Desde el 2009 al 2012, Aguas de Murcia ha participado en el proyecto BIOCELL con el objetivo de demostrar la viabilidad industrial de la producción de energía a partir de biogás en EDAR mediante pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) y de intercambio polimérica (PEMFC) y el desarrollo de herramientas adecuadas para su aplicación industrial.

En septiembre de 2012 puso en marcha una planta de cogeneración con una potencia eléctrica instalada de 1 MW, cubriendo así el 100% de las necesidades de calor y generando más del 40% de la electricidad que se consume en la planta.

### **INTRODUCCIÓN**

Entre los subproductos del proceso de depuración de los que es posible obtener el valor añadido, se encuentra el biogás generado durante la DA del fango. La DA es un proceso bioquímico a través del cual microorganismos anaerobios descomponen la materia orgánica compleja en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y un digestato que, si reúne las características adecuadas, puede ser utilizado como fertilizante en agricultura. El proceso controlado de DA es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos y la estabilización y reducción de cantidad final de lodos generados.

El biogás está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), su alto contenido en metano (entre un 50-70%) se traduce en un poder calorífico entre 6–7 kWh/Nm<sup>3</sup>, por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético, como sustituto de los combustibles fósiles tradicionales, ya sea solo o mezclado con otro combustible.

En el contexto del desarrollo sostenible la energía debe concebirse en términos de reducción del consumo, pero también hay que considerarla en términos de producción y uso de energía "verde".

En un futuro no muy lejano las plantas de tratamiento de agua residual no se consideraran como el fin de un ciclo, sino como centros de recuperación de recursos ("biorefinerías"), recuperando biogás, y utilizando los nutrientes, contenido graso, aceites y grasas en el agua residual como fuentes de energía (Olsson, 2012).

De las tecnologías para el uso de biogás en EDAR las más implantadas son la combustión en calderas, generando el calor necesario para mantener la temperatura de los digestores, plantas de cogeneración, produciendo calor y electricidad, y, más recientemente, las microturbinas (de Arespacochaga et al. 2012).

El enriquecimiento del biogás para obtener una calidad similar a la del gas natural (biometano) y su utilización como combustible de automoción o la inyección a una red de gas, es de las opciones existentes, la que más ha aumentado su potencial, con diversas experiencias exitosas a escala industrial en países como Alemania, Suecia, Suiza y Dinamarca (Petterson et al. 2009).

Debido a su alta eficiencia eléctrica y el reducido impacto ambiental, las pilas de combustible están llamadas a convertirse en una alternativa interesante para su implantación en EDAR (Spiegel et al. 1999), aunque es necesario un mayor esfuerzo en su desarrollo para que sean una opción económicamente competitiva. También parece prometedora la posibilidad de utilizar biogás purificado como combustible adicional en centrales eléctricas termo-solares.

Sea cual sea el uso final, la composición de biogás generado durante la DA de los lodos de depuradoras puede variar mucho y presentar trazas de varias impurezas, por lo que es necesario tratar el gas antes de su utilización para alcanzar unos estándares de calidad, que dependerán fundamentalmente de la tecnología utilizada para la valorización, pero también permitirán aumentar el poder calorífico del recurso, homogeneizar la composición del gas y preservar los equipos de los efectos nocivos de los contaminantes.

## **OBJETIVO**

Aguas de Murcia es la empresa mixta, participada en un 51% al Ayuntamiento de Murcia y el 49% por Hidrogea (Grupo Agbar), que gestiona el ciclo integral del agua en el municipio de Murcia.

De las plantas de tratamiento de aguas residuales gestionadas por Aguas de Murcia, la EDAR Murcia Este es la única que dispone de etapa de DA de lodos. En esta EDAR se tratan las aguas residuales urbanas de una población de 960.000 habitantes equivalentes, siendo el caudal de diseño de la planta de 100.000 m<sup>3</sup>/día. Dispone de tres digestores anaerobios con un volumen total de 18.317 m<sup>3</sup> y una producción de biogás de 2,7 NHm<sup>3</sup> biogás/año.

La empresa, consciente de que tanto el marco normativo, como el contexto económico-político, promueven la identificación de nuevas fuentes energéticas que reduzcan la dependencia y que sean medioambientalmente sostenibles, ha venido desarrollando en los últimos años diversos proyectos dirigidos a la valorización energética de residuos y al aprovechamiento de las energías renovables. El objeto de este documento es dar una visión general de las iniciativas de I+D desarrolladas por Aguas de Murcia desde el año 2004.

## DESCRIPCIÓN DE LAS INICIATIVAS

De 2004 a 2006, Aguas de Murcia desarrolla el proyecto ABICEC con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica de un proceso integrado para lograr un uso sostenible del biogás generado en EDAR mediante la eliminación selectiva de compuestos no deseados (Osorio et al. 2009). Para ello se construyó una planta piloto con capacidad para tratar hasta 10 Nm<sup>3</sup> biogás/hora, incluyendo las siguientes etapas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

- Lavado ácido (T1): Lavado en contracorriente del biogás con una disolución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), para eliminar compuestos traza nitrogenados.

- Lavado oxidativo (T2): Lavado en contracorriente del biogás con una solución de hipoclorito sódico (HNaClO) e hidróxido de sodio (NaOH), para eliminar hidrocarburos halogenados y aromáticos, en general, compuestos orgánicos volátiles (COV).

- Lavado básico (T3): Lavado en contracorriente del biogás con una disolución de NaOH para eliminar los compuestos traza de sulfuro.

- Enfriamiento: se hace pasar la corriente de biogás por un intercambiador de calor en el que se reduce la T<sup>a</sup> de la corriente hasta los 2°C, condensando la humedad para también otros componentes susceptibles de ser licuados al disminuir la temperatura, como los siloxanos y los hidrocarburos de cadena larga.

- Adsorción gas-sólido: se hace pasar el biogás a través de unas columnas de carbón activo impregnado en sosa bituminosa, quedando retenidos los restos de vapor de agua y trazas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, compuestos de azufre y nitrógeno de la corriente gaseosa.

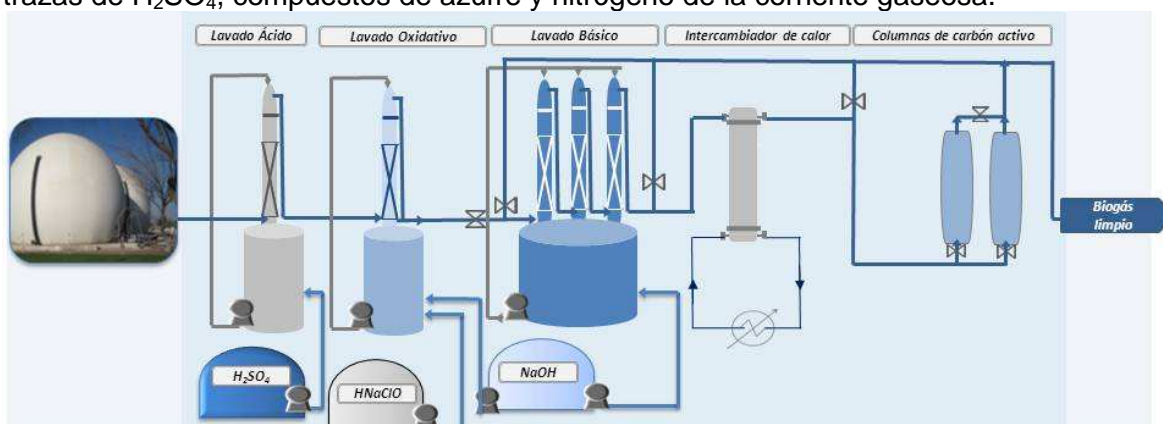


Figura 1. Diagrama de flujo de la planta piloto de limpieza de biogás.

Durante los ensayos realizados para optimizar el pretratamiento se valoraron distintas secuencias de módulos de lavado y distintos rangos de pH de operación, identificando las condiciones que ofrecen los mejores rendimientos de eliminación de contaminantes. Los puntos de muestreo considerados fueron la entrada a planta, la salida de las torres de lavado y la salida de la planta.

De 2007 a 2010, los esfuerzos se centraron en la evaluación de la viabilidad técnica de obtención de combustible para la automoción (BIOEDAR) a partir del biogás generado en la EDAR Murcia Este. El proyecto, denominado AMEB, permite la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera por el uso, de una manera ambientalmente sostenible, del CH<sub>4</sub> y del CO<sub>2</sub> (Osorio et al. 2011, Persson et al. 2006).

Así, a partir del biogás limpio, se obtienen una corriente rica CH<sub>4</sub> y una corriente rica en CO<sub>2</sub>, a través de dos procesos diferentes: (1) la absorción química con aminas y (2) la absorción física mediante lavado con agua a alta presión (water scrubbing). La corriente rica en CH<sub>4</sub> se comprime y almacena en unas botellas especiales y finalmente se utiliza como combustible para vehículos; la corriente rica en CO<sub>2</sub> se bombea a la cámara de ajuste de pH del reactor biológico.

A partir de la etapa de limpieza de biogás previa, se amplió la planta para realizar ensayos mediante las dos tecnologías de enriquecimiento de biogás, tal y como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

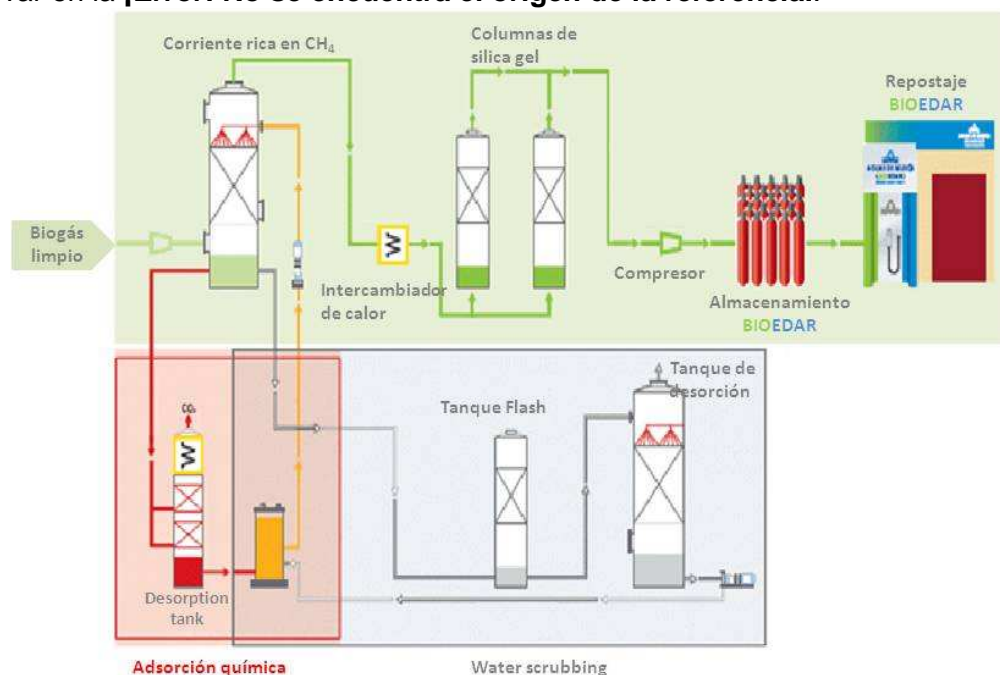


Figura 2. Diagrama de flujo planta piloto para el enriquecimiento del biogás.

La utilización de disoluciones de aminas para la eliminación de  $H_2S$  y  $CO_2$  de una corriente de gas natural es un proceso ampliamente empleado y presenta la ventaja de que, a altas temperaturas, es posible revertir el proceso. De acuerdo con los estudios de Astarita et al. (1983) alrededor del 10-20 % de la inversión inicial asociada a una unidad de tratamiento de gases mediante aminas dependerá de los requerimientos energéticos asociados a la regeneración. Además, aproximadamente un 70% de los costes de operación, corresponden a esta fase del proceso.

La corriente de biogás se introduce en las columnas de absorción donde se pone en contacto en contracorriente con la disolución de amina. Si la calidad del biogás obtenido cumple con los requisitos para poder ser utilizado como combustible para automoción, se procederá a la compresión, si no es así, se quemará en una antorcha. Uno de los requisitos fundamentales para que el aprovechamiento sea eficiente es que la humedad relativa de la corriente rica en  $CH_4$  sea inferior al 10%, por tanto es necesario un sistema de secado que lo garantice. A la salida de la torre de absorción se ha instalado un intercambiador de calor ( $1-2^{\circ}C$ ), condensando así la fracción de agua, y una columna de absorción con gel de sílice.

Además, para que el proceso sea sostenible, la disolución de amina saturada necesita ser regenerada, por ello se hace pasar por un intercambiador de calor y de ahí a una columna de desorción. La corriente gaseosa rica en  $CO_2$  sale por la parte superior de la columna y se envía mediante un compresor a la cámara de mezcla de regulación de pH previa al reactor biológico. La amina regenerada se enfría y se devuelve al proceso.

Las aminas estudiadas fueron: Monoetanolamina (MEA), Dietanolamina (DEA) y Metildietanolamina (MDEA), a concentraciones del 20 y el 40% en volumen y estableciendo en el proceso de desorción temperaturas superiores a  $90^{\circ}C$ .

El proceso de enriquecimiento del biogás a través de absorción con agua a alta presión se basa en el hecho de que el  $CO_2$  tiene una mayor solubilidad en agua que el  $CH_4$ . En la columna de absorción se pone en contacto en contracorriente, el biogás limpio y el agua

a alta presión, el CO<sub>2</sub> queda retenido en el agua y la corriente rica en CH<sub>4</sub> se envía a la etapa de secado.

El agua que sale de la columna de absorción se transfiere a un tanque flash, donde parte de gas se disuelve, y de ahí a una torre de desorción donde se libera el resto del CO<sub>2</sub>: la corriente rica en CO<sub>2</sub> se envía a la cámara de ajuste de pH del reactor biológico y el agua regenerada se devuelve al proceso.

De 2007 a 2010 Aguas de Murcia participó en el proyecto *SOSTAQUA: Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo del agua urbano autosostenible* ([www.sostaqua.com](http://www.sostaqua.com)), financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), Entidad Pública Empresarial, dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad. Algunas tareas del proyecto SOSTAQUA demandaban una alta especialización, por lo que Aguas de Murcia estableció un convenio de colaboración con el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP), centro de investigación que pertenece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), para desarrollar un catalizador específico que permitiera el reformado seco del biogás.

Desde el 2009 al 2012, Aguas de Murcia participó en el proyecto BIOCELL ([www.life-biocell.eu](http://www.life-biocell.eu)). Este estudio ha sido posible gracias a la financiación del programa LIFE+ (BIOCELL Project LIFE07 ENV/E/000847), y su objetivo ha sido demostrar la viabilidad industrial de la producción de energía a partir de biogás de EDAR mediante pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) y de intercambio polimérico (PEMFC) y el desarrollo de herramientas adecuadas para su aplicación industrial.

El carácter innovador del estudio desarrollado por Aguas de Murcia reside en que el hidrógeno (H<sub>2</sub>) con el que se alimentan las pilas se obtiene mediante un proceso de reformado seco, ya que el método habitual es mediante reformado húmedo. El reformado seco permite aprovechar el CO<sub>2</sub> presente en el biogás como oxidante durante la reacción, evitando las emisiones de este gas a la atmosfera.

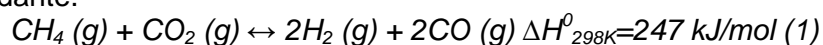
Para llevar a cabo los ensayos se construyó en la EDAR una instalación experimental compuesta de tres etapas: (1) pretratamiento de biogás, (2) procesador de combustible, formado por tres reactores independientes (REFormado, Water Gas Shift (WGS) y OXidación PReferencial de monóxido de carbono (CO, COPROX) y (3) dos PEMFC. A continuación se describe en mayor detalle el proceso.

De acuerdo con las características del biogás disponible, la bibliografía consultada, las recomendaciones de los fabricantes del catalizador desarrollado en el marco del proyecto SOSTAQUA y experiencias previas de valorización del biogás desarrolladas por Aguas de Murcia, se establecieron unos límites de calidad a la entrada del procesador de reformado relativos a contenido de [H<sub>2</sub>S] <0,1 ppm y siloxanos, [Si] <0,2 mg/Nm<sup>3</sup>.

El pretratamiento del biogás consiste en: lavado químico básico, intercambiador de calor y adsorción en carbón activo.

La corriente limpia de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se introduce en un procesador de combustible, con una capacidad de tratamiento de 5 Nm<sup>3</sup>/h, en el que se obtiene el H<sub>2</sub> a partir del biogás (Martín et al., 2012). El prototipo ha sido diseñado para obtener una alta eficiencia energética, recuperando el excedente de calor del sistema.

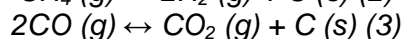
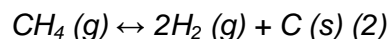
- **Reformado Catalítico:** En esta etapa se produce, fundamentalmente, la transformación catalítica de la corriente de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> y CO mediante la reacción (1). La peculiaridad en el diseño de esta unidad es que se trata de un reformado seco, es decir, sin utilizar agua y aprovechando el contenido en CO<sub>2</sub> de la propia corriente de biogás como oxidante.



Es una reacción endotérmica y se ve favorecida a temperaturas por encima de 700°C. El calor necesario se obtiene a través de un quemador, utilizando como combustible los gases de escape del ánodo de la pila de combustible (offgas) cuando el proceso está en

marcha y parte de la corriente de biogás de alimentación en el proceso de arranque del sistema.

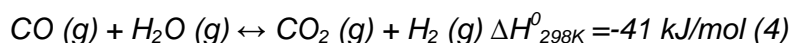
El catalizador de reformado, específico para este proceso, necesita unas condiciones de alimentación de CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> en relación 1:1 para evitar la deposición de carbón a causa de reacciones secundarias como el cracking del CH<sub>4</sub> (reacción 2) y de Boudard (reacción 3). Los depósitos de carbón se acumulan en forma de fibras sobre la superficie del catalizador, conduciendo a su deterioro y produciendo obstrucciones en los tubos del reformador.



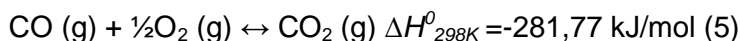
Otro de los inconvenientes a superar es que la composición del biogás bruto varía enormemente, presentando concentraciones de CH<sub>4</sub> muy irregulares. De forma general, la proporción CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> en el biogás generado en depuradoras es de 3:2. Dado que el contenido en CO<sub>2</sub> debe ser del 50% de la corriente, se ha dispuesto un analizador de gases en línea, que analiza la composición de la alimentación y manda señal al sistema para que suministre el CO<sub>2</sub> adicional necesario desde un depósito de almacenamiento de CO<sub>2</sub> puro.

- **Purificación de CO:** Consiste en la aplicación de dos procesos, WGS y COPROX, cuyo objetivo es la eliminación, casi en su totalidad, del CO en la corriente que alimentará a la pila, debido a que este compuesto constituye un veneno para las pilas PEM. Los niveles de tolerancia al CO típicos para este tipo de dispositivos se sitúan por debajo de 50 ppm. El CO es absorbido en el ánodo de platino (Pt) de la pila PEM, inhibiendo la disociación del H<sub>2</sub> en protones y en electrones. Las reacciones principales que se dan en esta etapa son:

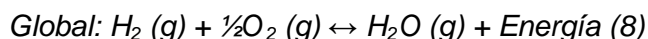
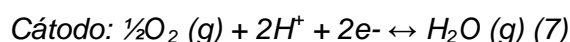
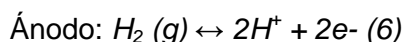
-**WGS:** consiste en la oxidación del CO, producido en la reacción anterior, a CO<sub>2</sub> mediante el desplazamiento de dicha reacción con vapor de agua (reacción 4), produciendo H<sub>2</sub> adicional y reduciendo la concentración de CO por debajo del 2% de la corriente a la salida. En este reactor, se añaden grandes cantidades de agua, para provocar el desplazamiento del equilibrio hacia los productos. Tras realizar ensayos en laboratorio, se ha establecido que la cantidad de agua necesaria debe ser 7 veces la cantidad estequiométrica. Se ha identificado el rango de temperatura que conduce a los resultados más favorables entre 300 y 350 °C.



-**COPROX:** consiste en la oxidación preferencial o combustión catalítica del CO (reacción 5), mediante la inyección de aire. La concentración de CO se sitúa en niveles adecuados para evitar la desactivación del catalizador de Pt. Aunque se fija el nivel máximo admisible de alimentación a las PEMFC de 50 ppm, se han identificado concentraciones inferiores a 10 ppm a la salida de este reactor.



- **Pilas de combustible:** el gas procedente del procesador de combustible está formado por una mezcla de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Esta corriente se utilizará para alimentar directamente dos pilas PEMFC, cuyo principio de funcionamiento es inverso al de la electrolisis (reacciones 6–8).



Las pilas utilizadas en estos ensayos son dos dispositivos, disponibles a nivel comercial, de la marca MES S.A., de 1,5 kWe de potencia nominal cada una. Estas pilas utilizan aire



como oxidante y la mezcla obtenida en el reformado como combustible. La refrigeración, necesaria para mantener la  $T^a$  óptima de operación, se obtiene directamente del aire. El consumo nominal a carga máxima, es decir, a 36 V, 42 A y 1.500 W, alcanza los 20 NL/min (litros en condiciones normales, 0°C y 1 atm).

Normalmente, las PEMFC operan con la salida del ánodo cerrada, a presión constante y consumiendo el  $H_2$  en función de la demanda. En este caso, las pilas disponen de una válvula de tres vías que permite purgar, de forma periódica, parte de la corriente, para eliminar las posibles impurezas que se alimenten junto al  $H_2$  y recircular el que no haya reaccionado a la entrada de la pila de combustible.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** puede observarse un diagrama de flujo de la instalación experimental construida para el desarrollo del proyecto BIOCELL:

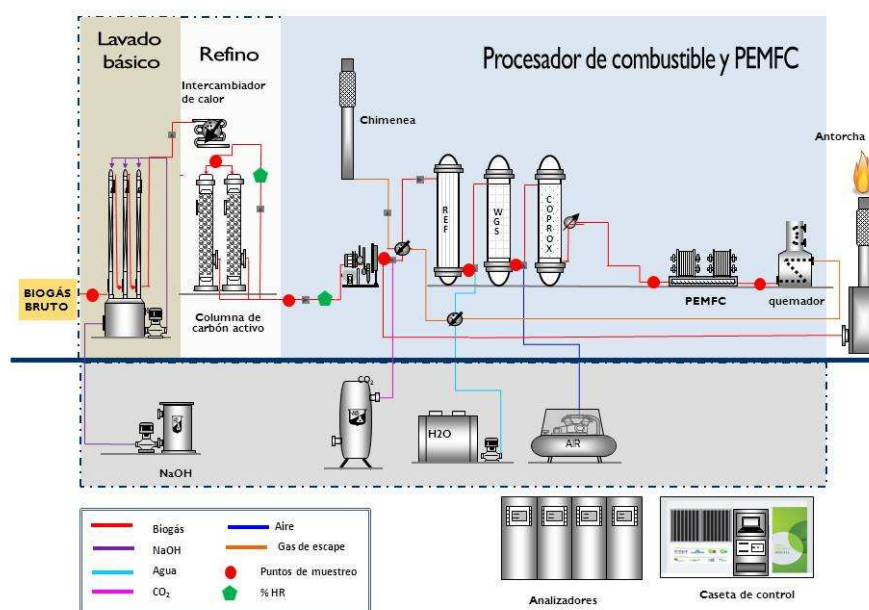


Figura 3. Diagrama de flujo de la planta piloto construida para el desarrollo del proyecto BIOCELL.

A escala industrial en septiembre de 2012 se puso en marcha una planta de cogeneración en la EDAR Murcia Este con una potencia eléctrica instalada de 1 MW.

Los fabricantes de los motogeneradores han establecido unos requisitos mínimos de calidad del biogás para evitar su deterioro. Estos límites son: (1) concentración de  $H_2S$  <300 ppm<sub>v</sub> y (2) concentración de siloxanos <10 mg/Nm<sup>3</sup>.

Para la eliminación de  $H_2S$  se ha instalado un sistema de desulfuración química THIOPAQ<sup>TM</sup>, que consiste en un lavado químico del biogás con una disolución de NaOH. La disolución saturada se regenera mediante un proceso biológico y se devuelve al proceso, combinando un alto rendimiento de eliminación y bajos costes operacionales.

Una vez que se ha eliminado el  $H_2S$  en el biogás, pasa a través de un intercambiador de calor gas-líquido refrigerante y un enfriador del líquido refrigerante para conseguir disminuir la temperatura del biogás hasta aproximadamente 5-10°C. Con estas temperaturas se alcanza un valor de humedad relativa menor del 50%, necesario para el óptimo funcionamiento de los siguientes módulos de pretratamiento.

El tratamiento de eliminación de siloxanos consiste en dos filtros de carbón activo en paralelo, de forma que cuando uno de ellos se satura, se hace pasar el biogás por el

segundo, mientras que el primero se regenera y así poder garantizar el suministro de biogás limpio a los motores de cogeneración.

El biogás limpio permite alimentar dos unidades de motogeneradores de biogás de la marca MWM y modelo TCG2016C V12 de 500 kWh cada uno, cabinados de forma independiente en contenedores de dimensiones 12,2 x 3,0 x 2,8 m.

El sistema de aprovechamiento de calor se compone de un doble circuito de intercambio, con un intercambiador de calor agua-fango de 1.038 kW. En el circuito secundario se dispone de una bomba de circulación de agua con otra gemela en paralelo para asegurar el funcionamiento continuo.

## **RESULTADOS**

En el transcurso del proyecto ABICEC se identificaron las condiciones de operación óptimas, desde un punto de vista técnico y económico, para obtener una corriente de biogás con una calidad adecuada. Combinando el lavado básico, la refrigeración y la adsorción con carbón activo se han obtenido rendimientos de eliminación de H<sub>2</sub>S del 99,99%. Estableciendo unas condiciones de pH=10,5-11 se garantizan concentraciones a la salida inferiores al límite de detección del equipo (0,12 ppm).

La experimentación con aminas llevada a cabo durante el proyecto AMEB ha permitido identificar la amina más adecuada, monoetanolamina (MEA) y la concentración (20%), obteniéndose así una corriente de BIOEDAR con un contenido de CH<sub>4</sub> superior al 96%.

Durante el proyecto SOSTAQUA se desarrolló un catalizador en base NiLaAl que permite reformar directamente una corriente limpia de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, generando H<sub>2</sub> y CO. Una de las características más atractivas de reformado seco es que el CO<sub>2</sub> de biogás se puede utilizar como oxidante durante la reacción de reformado, evitando las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Alimentando el proceso con una corriente de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en relación 1:1 y, estableciendo temperaturas de operación superiores a 700°C, ha sido posible alcanzar conversiones de metano en torno al 75%.

El proyecto BIOCELL ha permitido la implementación a gran escala de la tecnología de pila de combustible en el campo de biogás. El pretratamiento del biogás para poder alimentar el proceso de reformado ha sido altamente flexible, adaptándose a la gran variabilidad de composiciones registradas. Las pilas PEMFC se han alimentado con gas de síntesis antes de instalarse en el procesador de combustible PEMFC y el reformador ha estado funcionando en planta durante un total de 385 h. Debido a problemas técnicos, ha sido imposible alimentar las pilas con gas de reformado.

Desde su puesta en marcha, la planta de cogeneración permite cubrir el 100% de las necesidades de calor de la EDAR Murcia Este y generar más del 40% de la electricidad que se consume en la planta.

La producción y autoconsumo de la energía generada a partir del biogás en 2013 ha supuesto la reducción de la emisión de **1.318** toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

También se evitan las emisiones de SO<sub>2</sub> derivadas de la combustión en la antorcha del biogás sin pretratar. Las emisiones de SO<sub>2</sub> son parcialmente responsables de las lluvias ácidas y de los episodios de contaminación fotoquímica de los núcleos urbanos. Se estima que utilizando el biogás en la planta de cogeneración en 2013, se han dejado de emitir más de 38 toneladas de SO<sub>2</sub>.

## **CONCLUSIONES**

La mitigación del calentamiento global es una de las principales prioridades en las políticas energéticas y medioambientales de la UE. Además de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero, la producción y uso de biogás permitirá crear beneficios económicos y ambientales a escala local. Se espera, según lo establecido en el PER 2011-2020, que durante los próximos años la producción y el uso de biogás sean incentivados por el Gobierno español, estableciendo el marco legal y políticas tarifarias.

Se estima que en 2020, biomasa, biogás y residuos sólidos urbanos representarán una producción de energía de hasta 12.000 GWh (2.010, 4.228 GWh).

La variedad de los proyectos desarrollados por Aguas de Murcia ha permitido que la compañía atesore una gran experiencia en cuanto a técnicas de acondicionamiento de biogás y de tecnologías de aprovechamiento del recurso.

La CHP parece ser hoy en día la tecnología más madura y rentable a implantar en EDAR de tamaño medio y grande para la valorización del biogás.

El desarrollo de redes locales de inyección de gas también supone una alternativa de aprovechamiento del recurso muy prometedora, una vez definidas las especificaciones de calidad del gas procedente de fuentes no convencionales introducido en el Sistema Gasista (BOE núm. 6, 2013).

En cuanto a las pilas de combustible, la experimentación ha permitido concluir que la tecnología no está lo suficientemente desarrollada para su implantación a escala industrial, pero se espera que en el medio y largo plazo se consolide.

## REFERENCIAS

- Astarita G, Savage D W & Bisio A. 1983. Gas treating with chemical solvents. J. Wiley and Sons.
- Bauer F, Hultheberg C, Persson T & Tamm D. 2013. Biogas upgrading - Review of commercial Technologies, SGC Rapport 2013:270. Disponible en: [http://vav.griffel.net/filer/C\\_SGC2013-270.pdf](http://vav.griffel.net/filer/C_SGC2013-270.pdf). Consultado el 10 de octubre de 2014.
- de Arespacochaga N, Cortina JL, Mesa C, Martin M, Peregrina C & Bouchy L. 2012. Are fuel cells the best technology for cogeneration from sewage biogas? Benchmarking against other options based on real field data. Libro de comunicaciones del IWA World Water Congress & Exhibition Busan 2012.
- Deublein D & Steinhauser, A. 2008. Biogas from waste and Renewable Resources—An introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH. Weinheim.
- España. 2013. Resolución de 21 de diciembre de 2012, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 "Medición, Calidad y Odorización de Gas" de las normas de gestión técnica del sistema gasista. Boletín Oficial del Estado, 7 de enero de 2013, 6, pp. 889-892.
- Martín M, Castro M, de Arespacochaga N, Moya N. 2012. Pretratamientos del biogás de depuradora para su uso en pilas de combustible. Comunicaciones del Congreso Nacional de Pilas de Combustible (CONAPPICE) 2012, C-140.
- Martín M, Serna TR, de Arespacochaga N & López-Guillén I. 2012. Valorización del biogás de depuradora mediante pilas de combustible. Comunicaciones del Congreso Nacional de Pilas de Combustible (CONAPPICE) 2012, C-165.
- Olsson G. 2012. Water and Energy— threats and opportunities. IWA Publications.
- Osorio F & Torres JC. 2009. Biogas Purification from Anaerobic Digestion in a Wastewater Treatment Plant for Biofuel Production. Renewable Energy 34(10):2164–2171.
- Osorio F, Sánchez, M & Torres, JC. 2011. Preliminary studies for the obtention of biofuel by absorption with mono-ethanol-amine from a wastewater treatment plant. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and anaerobic digestion biogas in Environmental Effects. Disponible en: [www.smallwat.org](http://www.smallwat.org). Consultado el 28 de noviembre de 2012.
- Persson M, Jönsson O & Wellinger A. 2006. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. Publicaciones IEA Bioenergy, Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas. Disponible en: [www.iea-biogas.net](http://www.iea-biogas.net) . Consultado el 28 de noviembre de 2012.
- Petterson A & Wellinger A. 2009. Biogas upgrading technologies-developments and innovations. IEA Bioenergy, Task 37: Energy from biogas and landfill gas. Disponible en: [www.iea-biogas.net](http://www.iea-biogas.net). Consultado en 28 de noviembre de 2012.
- Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020. Publicaciones del Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía (IDEA). Disponible en: [www.idae.es](http://www.idae.es) Consultado el 9 de octubre de 2014.
- Proyecto BIOCELL: ENERGY SELF-SUSTAINING AND ENVIRONMENTAL FOOTPRINT REDUCTION ON WASTEWATER TREATMENT PLANTS VIA FUEL CELLS (BIOCELL). Disponible en: [www.life-biocell.eu](http://www.life-biocell.eu). Consultado el 17 de julio de 2013.

Proyecto SOSTAQUA. Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible. Disponible en: [www.sostaqua.com](http://www.sostaqua.com). Consultado el 9 de octubre de 2014.

Spiegel R J, Thorneloe S A, Trocciola J C & Preston J L. 1999. Fuel cell operation on anaerobic digester gas: conceptual design and assessment. Waste Management 19: 389–399.