

Sostenibilidad energética de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales

Mar Castro-García^{1*}, Marcos Martín-González², Natividad Moya-Sánchez³, Teresa Serna-Box³

¹Aqualogy Aqua Ambiente, Plaza de Cetina, 6, 2º, 30001, Murcia.

²EMUASA, Plaza Circular, 9, 30008, Murcia.

³Aqualogy Medio Ambiente, Avda. de la Diagonal, 211, 08018 Barcelona.

* correspondencia: mcastrog@aqualogy.net

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. En un contexto del desarrollo sostenible, la energía en las EDAR debe ser considerada no sólo en términos de reducción del consumo, sino también en términos de producción y uso de energía 'verde'.

Aguas de Murcia es una 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. La empresa es consciente de que todas sus actividades deben realizarse de forma sostenible y, por ello, desde el año 2004 ha estado desarrollando varios proyectos de I+D dirigidos a poner en valor el biogás generado durante el tratamiento de lodos. El objeto de este estudio es, a partir de datos reales obtenidos en planta, establecer una comparativa entre cuatro vías distintas de aprovechamiento del biogás: (1) combustible de automoción, (2) inyección a red, (3) generación de hidrogeno (H₂) para alimentar una pila de combustible y (4) combustible en una planta de cogeneración (*combined heat and power*, CHP), desde un punto de vista económico y medioambiental.

Abstract

There is a growing tendency to consider the Waste Water Treatment Plants (WWTP) as resource recovery systems, rather than only facilities to prevent release of pollutants to the environment. The recovery of energy and added value products maximizes the economic and environmental potential of the facilities, thereby allowing the reduction of operating costs. In the context of sustainable development and particularly in the case of WWTP, energy must be considered not only in terms of consumption reduction, but also in terms of production and use of "green" energy.

Aguas de Murcia is a mixed company, 51% owned by the City of Murcia and 49% by Agbar Group, that manages the water cycle in the municipality of Murcia. The company is aware that all its activities should be done in a sustainable way and, for that reason, since 2004 has been carrying out several research and development projects focused on the valorization of biogas generated during the sludge treatment. The purpose of this study is, based on ground data; establish a comparison, from an economic and environmental point of view, between four different ways of using biogas: (1) automotive fuel, (2) injection to the grid, (3) generation of hydrogen (H₂) to feed a fuel cell and (4) fuel in a cogeneration (*combined heat and power*, CHP).

Palabras clave: energía, biogás, viabilidad económica, viabilidad medioambiental

Introducción

El propósito principal del paquete de legislación de la Unión Europea (UE) en materia de energía y cambio climático es la introducción de una serie de medidas que garanticen el cumplimiento de los compromisos asumidos por el Consejo Europeo en marzo de 2007, para reducir las emisiones globales de efecto invernadero en Europa en un 20% para 2020, con respecto a los niveles registrados en 1990. Por otra parte, en el marco de la Política Común de la Energía (CEP), el Consejo Europeo está promoviendo el objetivo de que el 20% del consumo total de energía de la UE proceda de fuentes de energía renovable antes de 2020.

En el ámbito nacional el Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020, aprobado en noviembre de 2011, promociona el uso del biogás. Desde un punto de vista técnico, la eficiencia energética de su uso directo para calefacción/refrigeración se ha incrementado de manera significativa, por lo que es necesario avanzar en la consolidación de un marco legislativo adecuado para promover el uso del recurso con garantías de calidad y seguridad, como en el desarrollo de tecnologías para reducir la costos asociados a la limpieza y el enriquecimiento.

La digestión anaerobia es un proceso microbiológico de descomposición de la materia orgánica, en ausencia de oxígeno. En el proceso se obtienen dos productos principales: biogás y digestato. El biogás es un gas combustible compuesto de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas cantidades de otros gases y elementos traza. El potencial energético del biogás está directamente ligado al contenido en CH_4 y su composición es muy variable, dependiendo, en el caso del biogás generado en EDAR, del agua residual tratada, el sistema de digestión, la temperatura, tiempo de retención, etc (Deublein et al. 2008).

En el contexto del desarrollo sostenible y en particular en el caso de las EDAR, la energía debe ser considerada no sólo en términos de reducción de los consumos, sino también en términos de producción y uso de energías "verdes". La tradicional antorcha en la que se quema el biogás en exceso ya no se puede considerar una solución válida a largo plazo. En este momento, existen una serie de soluciones comerciales que nos permiten explotar el poder calorífico del biogás.

Entre 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, microturbinas (Arespachaga 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 (Pettersen 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 digestión anaerobia 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, eliminando los compuestos indeseados, principalmente sulfuro de hidrógeno (H_2S), siloxanos y agua, alcanzando unos estándares de calidad que dependerán fundamentalmente de los requisitos establecidos por 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 dichos contaminantes.

La mitigación del calentamiento global es una de las principales prioridades en las políticas energéticas y medioambientales de la UE, pero por otra parte, la producción y el uso del biogás permiten crear muchos beneficios económicos y ambientales en las zonas limítrofes y las perspectivas indican que durante los próximos años su aprovechamiento estará fuertemente promovido desde la administración.

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. La empresa es consciente de que todas sus actividades deben desarrollarse de forma sostenible y, por ello, desde el año 2004 ha participado en varios proyectos de investigación y desarrollo enfocados en la puesta en valor del biogás generado durante el tratamiento de lodos.

De las plantas de tratamiento de aguas residuales gestionadas por Aguas de Murcia, la EDAR Murcia Este es la única que dispone de digestión anaerobia de lodos. En esta EDAR se tratan las aguas residuales urbanas de una población equivalente de 960.000 habitantes equivalentes, siendo el caudal de diseño de la planta de 100.000 $\text{m}^3/\text{día}$. Dispone de tres

digestores anaerobios con un volumen total de 18.317 m³ y una producción de biogás de 2,7 NHm³ biogás/año.

El objeto de este documento es dar una visión general de varios de los proyectos de I+D y la experiencia industrial de Aguas de Murcia en el tratamiento y en el uso del biogás. Los datos obtenidos permitirán finalmente realizar una comparativa entre cuatro vías distintas de aprovechamiento del biogás: (1) como combustible de automoción, (2) inyección a red, (3) generación de H₂ para alimentar una pila de combustible y (4) combustible en CHP, desde un punto de vista económico y medioambiental.

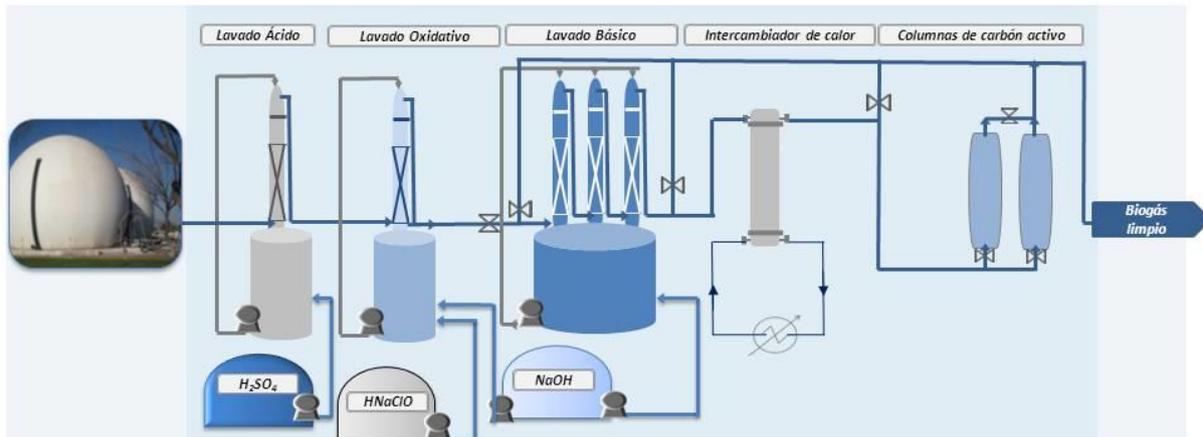


Figura 1. Diagrama de flujo de la planta de limpieza de biogás.

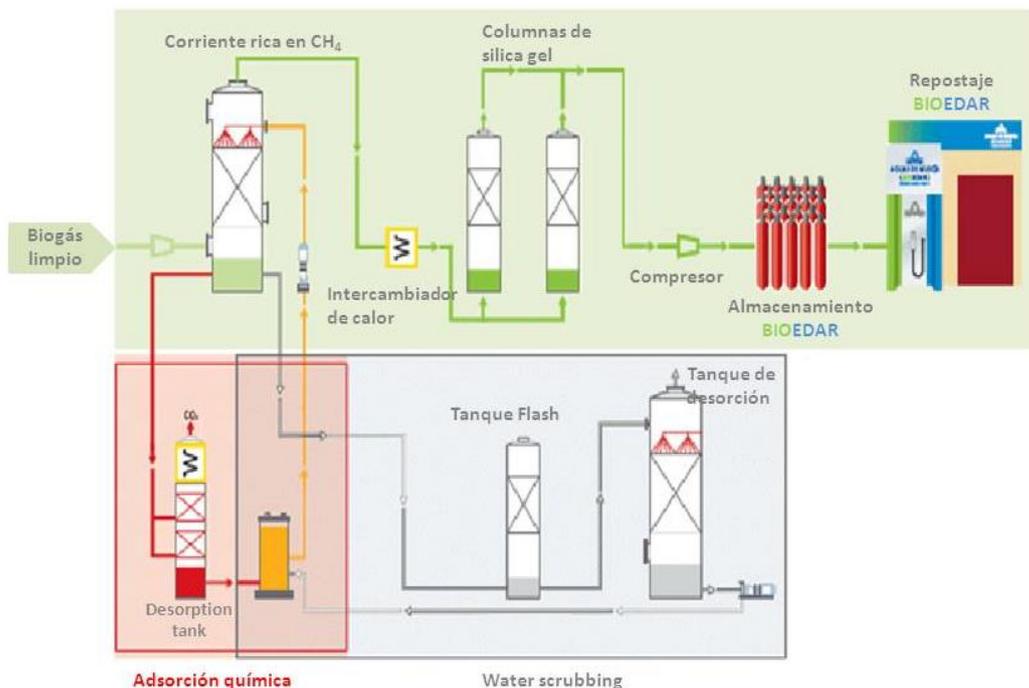


Figura 2. Diagrama de flujo de los dos procesos de enriquecimiento de biogás valorados.

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 Nm³ biogás/hora, incluyendo las siguientes etapas (Figura 1):

- Lavado ácido (T1): Lavado en contracorriente del biogás con una disolución de ácido sulfúrico (H₂SO₄), 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^a 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 H₂SO₄, compuestos de azufre y nitrógeno de la corriente gaseosa.

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 CH₄ y del CO₂ (Osorio et al. 2011; Persson et al. 2006).

Así, a partir del biogás limpio, se obtienen una corriente rica CH₄ y una corriente rica en CO₂, 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 CH₄ se comprime y almacena en unas botellas especiales y finalmente se utiliza como combustible para vehículos; la corriente rica en CO₂ se bombea a la cámara de ajuste de pH del reactor biológico.

mediante las dos tecnologías de enriquecimiento de biogás, tal y como se puede observar en la Figura 2.

La utilización de disoluciones de aminas para la eliminación de H₂S y CO₂ 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 CH₄ 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°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 CO₂ 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°C.

El proceso de enriquecimiento del biogás a través de absorción con agua a alta presión se basa en el hecho de que el CO₂ tiene una mayor solubilidad en agua que el CH₄. En la columna de absorción se pone en contacto en contracorriente, el biogás limpio y el agua a alta presión, el CO₂ queda retenido en el agua y la corriente rica en CH₄ 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 CO₂: a corriente rica en CO₂ 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), 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 ha participado en el proyecto BIOCELL (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 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.

El carácter innovador del estudio desarrollado por Aguas de Murcia es que el hidrógeno (H₂) 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 CO₂ presente en el biogás como oxidante durante la reacción, evitando las emisiones de este gas a la atmósfera.

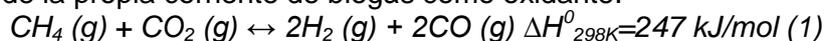
Para llevar a cabo los ensayos se construyó en la EDAR una instalación experimental compuesta de tres etapas: (1) pretratamiento de biogás, (2) procesador de combustible, formado por tres reactores independientes (REFormado, Water Gas Shift (WGS) y OXidación PReferencial de monóxido de carbono (CO, COPROX) 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 [H₂S] <0,1 ppm y siloxanos, [Si] <0,2 mg/Nm³.

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

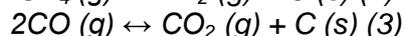
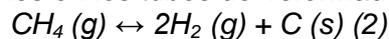
La corriente limpia de CH₄ y CO₂ se introduce en un procesador de combustible, con una capacidad de tratamiento de 5 Nm³/h, en el que se obtiene el H₂ a partir del biogás (Martin et al., 2012). El prototipo ha sido diseñado para obtener una alta eficiencia energética, recuperando el excedente de calor del sistema.

- Reformado Catalítico: En esta etapa se produce, fundamentalmente, la transformación catalítica de la corriente de CH₄ y CO₂ en H₂ 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 CO₂ 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.

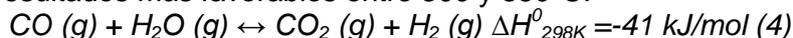
El catalizador de reformado, específico para este proceso, necesita unas condiciones de alimentación de $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ en relación 1:1 para evitar la deposición de carbón a causa de reacciones secundarias como el cracking del CH_4 (reacción 2) y de Boudard (reacción 3). Los depósitos de carbón se acumulan en forma de fibras sobre la superficie del catalizador, conduciendo a su deterioro y produciendo obstrucciones en los tubos del reformador.



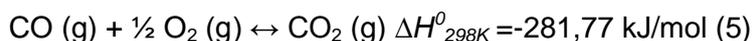
Otro de los inconvenientes a superar es que la composición del biogás bruto varía enormemente, presentando concentraciones de CH_4 muy irregulares. De forma general, la proporción $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ en el biogás generado en depuradoras es de 3:2. Dado que el contenido en CO_2 debe ser del 50% 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_2 adicional necesario desde un depósito de almacenamiento de CO_2 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_2 en protones y en electrones. Las reacciones principales que se dan en esta etapa son:

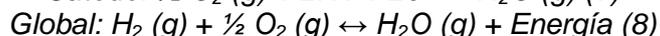
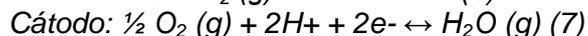
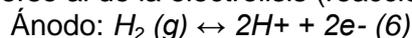
-WGS: consiste en la oxidación del CO, producido en la reacción anterior, a CO_2 mediante el desplazamiento de dicha reacción con vapor de agua (reacción 4), produciendo H_2 adicional y reduciendo la concentración de CO por debajo del 2% de la corriente a la salida. En este reactor, se añaden grandes 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_2 y CO_2 . 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. 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 Figura 3 puede observarse un diagrama de flujo de la instalación experimental construida para el desarrollo del proyecto BIOCELL:

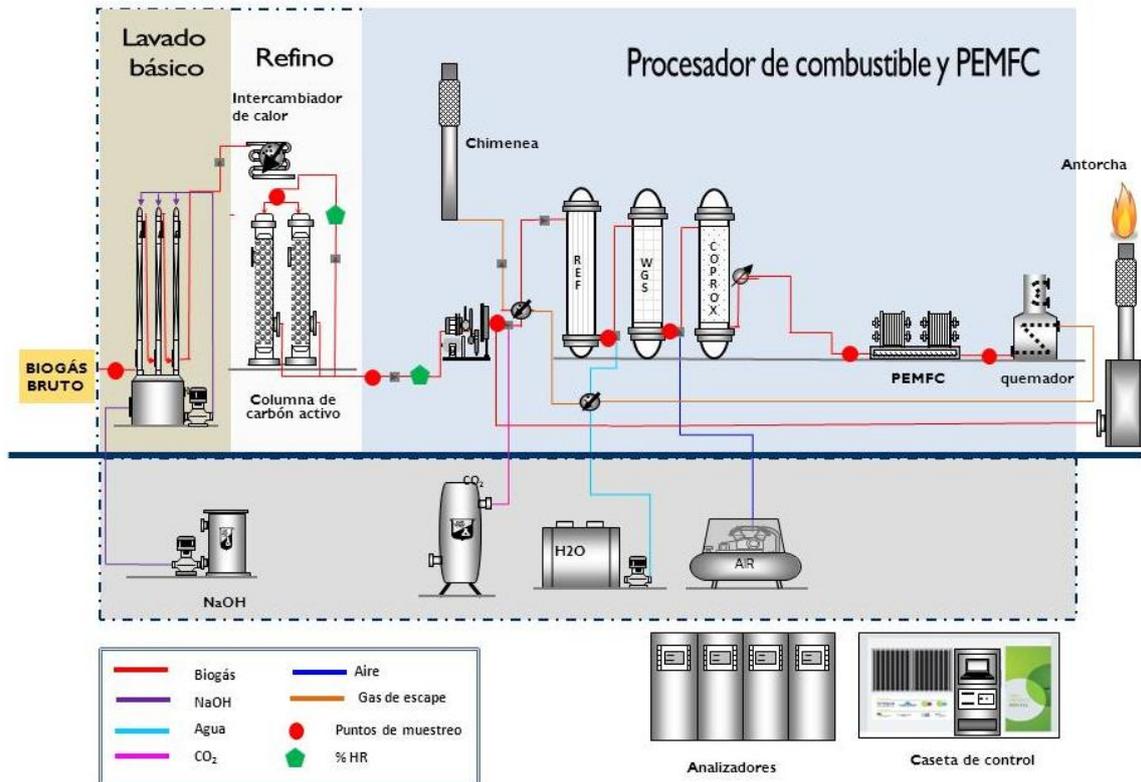


Figura 3. Diagrama de flujo de la planta piloto construida para el desarrollo del proyecto BIOCELL.

En septiembre de 2012 se ha puesto en marcha una planta de cogeneración en la EDAR Murcia Este con una potencia eléctrica instalada de 1 MW y capacidad para quemar hasta 7.300 Nm³ de biogás/día.

Los fabricantes de los motogeneradores han establecido unos requisitos mínimos de calidad del biogás para evitar su deterioro. Estos límites son: (1) Concentración de H₂S <300 ppm_v y (2) Concentración de siloxanos <10 mg/Nm³.

Para la eliminación de H₂S se ha instalado un sistema de desulfuración química THIOPAQ®, 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 H₂S 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 el que está trabajando 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.

Resultados y discusión

Durante el proyecto ABICEC fue posible caracterizar en detalle el biogás generado en la EDAR Murcia Este. Todas las analíticas realizadas al biogás, tanto por laboratorios externos como las efectuadas en la propia instalación, coinciden en que el contenido de H₂S del biogás bruto es muy alto debido al elevado contenido en sulfatos de las aguas residuales que llegan a la planta, procedentes de los suelos por los que discurre el agua prepotable desde su origen a la llegada a Murcia. Se registraron concentraciones de H₂S a la entrada de la planta muy variables, comprendidas entre máximos de 6.352 ppm en Marzo y mínimos de 579 ppm en Agosto. En la Tabla 1 se recogen las concentraciones de H₂S en los distintos puntos de muestreo para los distintos pH de operación valorados.

Tabla 1. Resultados obtenidos en los ensayos de optimización del pretratamiento del biogás bruto generado en la EDAR Murcia Este.

Torres de lavado	pH (T3)	[H ₂ S] entrada planta (ppm)	[H ₂ S] salida torres de lavado (ppm)	Rendimiento 1 (%)	[H ₂ S] salida planta (ppm)	Rendimiento 2 (%)
T3	9,5-10,0	3.023,57	264,35	89,06	0,12	99,99
	10,5-11,0	3.324,39	13,95	99,47	0,12	99,99
T1+T3	9,5-10,0	3.906,67	484,40	88,94	0,12	99,99
	10,5-11,0	3.068,20	226,26	95,38	0,12	99,99
T2+T3	9,5-10,0	2.636,67	172,70	94,67	0,12	99,99
	10,5-11,0	3.706,96	13,92	99,49	0,12	99,99
T1+T2+T3	9,5-10,0	3.360,00	325,22	93,14	0,12	99,99
	10,5-11,0	2.808,57	72,75	98,34	0,12	99,99

Combinando el lavado básico, la refrigeración y la adsorción con carbón activo se obtienen rendimientos de eliminación de H₂S del 99,99 %. Los mejores resultados se registran trabajando a pH=10,5-11, garantizándose concentraciones de sulfuro de hidrógeno en la salida inferiores al límite de detección del equipo. (0,12 ppm).

La experimentación con aminas llevadas a cabo durante el proyecto AMEB ha permitido identificar la amina más adecuada, MEA, y la concentración, 20%, estableciendo como temperatura de desorción 98°C, y obteniéndose así una corriente de BIOEDAR con un contenido de CH₄ superior al 96%. En la Tabla 2 se incluye un resumen de los resultados obtenidos.

Mediante absorción con agua a alta presión no se han conseguido resultados satisfactorios en cuanto a separación de las corrientes. A pesar de que hay abundancia de referencias en plantas de depuración y que los costes de operación son inferiores a los registrados en la absorción química, mediante los ensayos realizados en planta piloto no ha sido posible obtener una corriente de BIOEDAR con una concentración suficiente de metano como para que el aprovechamiento energético del combustible sea eficiente, tal y como puede observarse en la Tabla 3.

Con respecto a SOSTAQUA, el catalizador obtenido permite reformar directamente una corriente limpia de CH₄ y CO₂, generando H₂ y CO. Una de las características más atractivas de reformado seco es que el CO₂ 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 CH₄ y CO₂ en relación 1:1 y, estableciendo temperaturas de operación superiores a 700°C, es 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. La principal conclusión asociada al proyecto es que actualmente la tecnología PEMFC no está madura desde un punto de vista técnico-económico, pero se sigue trabajando en este sentido y se espera que en el medio y largo plazo se produzca un desarrollo industrial significativo.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de optimización del proceso de enriquecimiento del biogás mediante absorción química con MEA.

Tipo de amina	MEA	
Concentración	20	%vol.
Temperatura	98	°C
Caudal de amina	300	L/h
Caudal de biogás entrada	9,9	Nm ³ /h
Composición biogás entrada	33,53	%CO ₂
	66,01	%CH ₄
Caudal de biogás salida	6,57	Nm ³ /h
Composición biogás salida	3,48	%CO ₂
	96,06	%CH ₄
Rendimientos del proceso	93,94	%
Consumos energéticos	1,43	kWh/Nm ³

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos durante la optimización del proceso de enriquecimiento del biogás mediante absorción física con agua.

Presión [bar]	Entrada			Salida			Consumos energéticos [kW/Nm ³]	Rendimiento del proceso [%]
	Caudal [Nm ³ /h]	CH ₄ %	CO ₂ %	Caudal [Nm ³ /h]	CH ₄ %	CO ₂ %		
5	9,43	60,01	39,99	7,33	60,57	39,43	0,36	23,38
6	9,43	59,00	41,00	6,29	61,46	38,54	0,43	37,26
7	9,30	59,10	40,90	7,33	60,70	39,30	0,55	24,29
8	9,41	59,03	40,97	5,04	59,87	40,13	0,35	47,54
8,5	9,56	58,38	41,62	4,68	59,36	40,64	0,45	52,18

Tabla 4. Composición de las corrientes de entrada y salida al pretratamiento de biogás incluido en el proyecto BIOCELL y costes operativos asociados a cada una de las etapas.

	Entrada	Salida
CH ₄	62-65 %	68-74%
CO ₂	35-37 %	24-34%
O ₂	0-1%	0%
H ₂ S	3.000- 4.400 ppm	0-45 ppm
Si	2,79-3,32 mg Si/Nm ³	0 - 0,1 Si/Nm ³
OPEX	Lavado básico [c€/Nm ³]	3,18
	Refino [c€/Nm ³]	3,10
	TOTAL [c€/Nm ³]	6,28

Tabla 5. Costes operativos asociados a la operación del procesador de combustible y las pilas PEMFC.

OPEX	Consumos eléctricos	1,445	€/año
	Consumo de CO ₂	3,381	€/ año
	Catalizador	1,000	€/año
	Otros	1,181	€/ año
	Mano de obra	0.5	h/día
	Mantenimiento	10,701	€/año
TOTAL		17,653	€/año

El pretratamiento del biogás para poder alimentar el proceso de reformado ha sido altamente flexible, adaptándose a la gran variabilidad de composiciones registradas a la entrada en un corto espacio de tiempo, y efectivo, garantizando el cumplimiento de los requisitos de calidad establecidos para alimentar el procesador de combustible. (Martin et al. 2012) En la Tabla 4 se incluyen las composiciones medias de las corrientes de entrada y salida al pretratamiento de biogás incluido en el proyecto BIOCELL, así como los costes operativos (OPEX) asociados a cada una de las etapas.

Las pilas PEMFC se han alimentado con bajo gas de síntesis antes de instalarse en el procesador de combustible PEMFC y han estado funcionando intermitentemente desde diciembre 2012 a mayo 2012 en la EDAR Murcia Este durante un total de 385 h.

Debido a problemas técnicos, ocasionados por equipos auxiliares como los analizadores, ha sido imposible alcanzar concentraciones de CO inferiores a 50 ppm de forma estacionaria, imposibilitando que las pilas se alimentasen con gas de reformado. En la Tabla 5 se recoge un resumen del estudio económico realizado a partir de resultados obtenidos mediante el programa de simulación de proceso ChemCAD®, con el soporte de datos obtenidos en ensayos de laboratorio e información obtenida en campo (consumos energéticos) para un procesador de combustible alimentado por 5 Nm³/h de biogás.

Aunque todavía no se ha operado durante un año completo la planta, 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. Las previsiones son que se cubra el total de las necesidades térmicas de la planta y aproximadamente el 40% de los consumos eléctricos. La utilización del biogás generado en la EDAR puede suponer la reducción de más de 3.600 toneladas de CO₂ al año que, en otro caso, se emitirían a la atmósfera si esta energía se obtuviese a partir de combustibles fósiles.

También se evitan las emisiones de SO₂ derivadas de la combustión en la antorcha del biogás sin pretratar. Las emisiones de SO₂ 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 se dejaran de emitir más de 25 toneladas de SO₂ al año.

Conclusiones

La mitigación del calentamiento global es una de las principales prioridades en las políticas energéticas y medioambientales de la UE. Además de contribuir a la consecución de los objetivos de la UE, la producción y uso de biogás a escala local permitirá crear muchos beneficios económicos y ambientales en las áreas circundantes. 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 información disponible tanto de la bibliografía como de las experiencias a escala piloto e industrial permitirán establecer una comparativa entre cuatro vías distintas de aprovechamiento del biogás: (1) combustible de automoción, (2) inyección a red, (3) generación de hidrógeno (H₂) para alimentar una pila de combustible y (4) combustible en una planta de cogeneración, desde un punto de vista económico y medioambiental.

Referencias

- de Arespachoga 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.
- Astarita G, Savage DW & Bisio A. 1983. Gas treating with chemical solvents. J. Wiley and Sons.
- de Arespachoga 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.
- 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. Proceedings CONAPPICE Congreso Nacional Pilas de Combustible 2012, C-165.
- 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: <http://www.smallwat.org> (accedido el 28 de noviembre de 2012).
- Persson M, Jönsson O & Wellinger A. 2006. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. Publicaciones IEA Bionergy, Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas. Disponible en: <http://www.iea-biogas.net/> (accedido 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: [http://www.iea-biogas.net.](http://www.iea-biogas.net/)(accedido el 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: <http://www.idae.es> (accedido el 27 de noviembre de 2012).
- Proyecto BIOCELL: energy self-sustaining and environmental footprint reduction on wastewater treatment plants via fuel cells (BIOCELL). Disponible en: www.life-biocell.eu (accedido el 17 de julio de 2013).
- Proyecto SOSTAQUA. Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible. Disponible en: www.sostaqua.com (accedido el 17 de junio de 2013).
- Spiegel RJ, Thorneloe SA, Trocciola JC & Preston JL. 1999. Fuel cell operation on anaerobic digester gas: conceptual design and assessment. *Waste Management* 19: 389–399.