

Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás

Betzabet Morero *, Eduardo Gropelli** y Enrique A. Campanella***

Abstract

As it is necessary to propose a sustainable change in Argentinean energy matrix is important to study new sources of energy production to reduce dependency of hydrocarbons. Those compounds are not only in short supply but also its combustion produces greenhouse gases. Biogas is a valuable renewable fuel obtained from organic waste materials solving contamination problems and reducing greenhouse gases. Methane and carbon dioxide are its main components, but biogas also contains contaminants such as hydrogen sulphide and siloxanes. The presence of these compounds different than methane constitutes a problem because they are detrimental to any biogas processing equipment and they generate harmful emissions. Then, it is important to include biogas purification before its final use. This paper reviews the state of the art in biogas purification. A promising purification methods is absorption in aqueous solutions because it is economical and works for carbon dioxide and hydrogen sulphide removal. The paper presents an analysis of biogas purification processes showing its applicability.

Keywords: energy matrix, renewable energy, biogas purification, carbon dioxide, hydrogen sulphide.

Fecha de recepción del original: 28/05/2010 | Fecha de evaluación del original: 21/07/2010

• Universidad Nacional del Litoral, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Güemes 3450, Santa Fe, Argentina, 3000 | e-mail: bmorero@intec.unl.edu.ar

•• Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Grupo de Energía No Convencional, Santiago del Estero 2829, Santa Fe, Argentina, 3000 | e-mail: gropellieduardo@arnet.com.ar

••• Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Ruta Nacional N° 168 Km 472.4, Santa Fe, Argentina, 3000 | e-mail: tqique@santafe-conicet.gov.ar

Resumen

Como es necesario proponer un cambio sustentable en la matriz energética Argentina resulta primordial estudiar nuevas fuentes de generación de energía, disminuyendo la alta dependencia de los hidrocarburos. Estos compuestos tienen la desventaja no solo de ser agotables sino además de contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero. El biogás es un valioso combustible renovable, ya que puede ser producido a partir de materia orgánica desechable, solucionando problemas relacionados a los residuos y disminuyendo los gases de efecto invernadero al aprovechar el metano eliminado por dichos desechos orgánicos. Sus principales componentes son metano y dióxido de carbono, aunque también contiene contaminantes tales como ácido sulfhídrico y siloxanos. La presencia de tales compuestos diferentes al metano constituye un problema ya que son perjudiciales para cualquier equipo de procesamiento de biogás y producen emisiones contaminantes. Por lo tanto es importante incluir etapas de purificación antes de utilizar el biogás. Este trabajo revisa el “estado del arte” de los diferentes procesos de purificación de biogás. Un método muy conveniente es el proceso de absorción acuosa porque es un método económico, sencillo y elimina tanto el dióxido de carbono como el ácido sulfhídrico. El trabajo presenta un análisis detallado de los distintos procesos mostrando su aplicabilidad.

Palabras clave: matriz energética, energía renovable, purificación de biogás, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico.

1. Introducción

La alta dependencia que existe en el país de los combustibles fósiles como fuente primaria para la generación de energía determina la insustentabilidad de la matriz energética. Por lo tanto resulta necesario diversificar esa matriz con la incorporación de fuentes de energía renovable, utilizadas de un modo sustentable. El potencial que tiene el país en renovables es lo suficientemente elevado como para que jueguen un rol de peso en la matriz. No sólo debe observarse al sector eléctrico como el destinatario de esta producción, debe trabajarse con fuerza sobre el sector térmico y el de transporte, que son los más consumidores.

Una opción muy interesante para la sustitución de hidrocarburos por fuentes renovables de energía es el aprovechamiento del biogás. El biogás se produce a partir de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos que pueden provenir de fuentes industriales, municipales y/o agrícolas. Se solucionan de esta manera los problemas relacionados con la contaminación de los diferentes tipos de desperdicios biológicos y a la vez se contribuye a disminuir el calentamiento global al reducir la alta dependencia con los hidrocarburos y al aprovechar el metano eliminado por dichos desperdicios.

La composición aproximada del biogás se estima en 60% de metano (CH_4), 35% de anhídrido carbónico (CO_2), 4% de vapor de agua y estimativamente un máximo de 1% de ácido sulfhídrico (SH_2). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que el biogás puede contener 577 compuestos trazas incluyendo hidrocarburos halogenados, alcanos superiores (mayor a C_2) e hidrocarburos aromáticos. Normalmente los compuestos trazas constituyen solo el 1% del volumen del biogás.

La capacidad calorífica del biogás es determinada principalmente por el porcentaje de metano presente. El metano puro tiene una capacidad calorífica de 9.97 kWe/m^3 , y es el único constituyente significativo de hidrocarburo presente en el biogás que es convertido en energía eléctrica/mecánica a partir de un proceso de combustión. Por otra parte, algunos compuestos aromáticos (ej. benceno) e hidrocarburos clorados (ej. cloroetano) pueden causar daños en la salud, otros son muy olorosos (ej. terpenos, esteroides y tioles) y algunos pueden dañar la planta de utilización de gas (ej. organohalogenados, especies de azufre y siloxanos). Por consiguiente, la purificación del biogás es importante tanto desde el punto de vista de la salud como del medio ambiente e impacta en el funcionamiento y la eficiencia del equipo de biogás. La ventaja de este tipo de combustible radica en que es amigable con el ambiente, limpio y barato.

El objetivo de este trabajo es discutir las principales tecnologías de purificación del biogás.

2. Estado del Arte: Descripción de Tratamientos

2.1 Tratamiento Primario

Las tecnologías de tratamiento primario representan la primera etapa en la reducción de la cantidad de contaminantes del biogás y normalmente usan operaciones de procesos físicos simples. Los principales contaminantes removidos (o reducidos) son agua (contaminada) llamada “condensado” y partículas. Estas tecnologías se han empleado por muchos años en diferentes procesos y son actualmente adaptadas a las plantas de manejo de biogás [1].

2.2 Tratamiento Secundario

Los tratamientos secundarios son diseñados para proporcionar un nivel de limpieza de gas mayor que el alcanzado utilizando sólo tratamiento primario e incluyen tratamientos físicos y químicos [2]. Se hará una breve descripción de los mismos, ordenados por contaminante eliminado.

2.2.1 Eliminación de CO₂

Absorción física: Los métodos de absorción fisicoquímicos se utilizan normalmente en la purificación de biogás ya que son efectivos incluso a bajos caudales. Además este método es menos complicado, requiere poca infraestructura y es de bajo costo. Un método fácil y económico utiliza agua presurizada como absorbente. El biogás crudo es comprimido y alimentado desde el fondo a una columna de lecho empacada y el agua presurizada es rociada desde la cima de la columna. El proceso de absorción es un proceso contra-corriente. De esta forma se disuelven el CO₂ y el H₂S en agua y salen por el fondo de la torre. El agua puede ser recirculada a una torre de purificación.

Absorción química: La absorción química implica la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente, por lo tanto, comprende la ruptura de esos enlaces y el correspondiente aporte de energía. Los solventes químicos generalmente emplean soluciones acuosas de aminas (ej. mono-, di- o tri-ethanolamine) o soluciones acuosas de sales alcalinas (ej. hidróxido de sodio, potasio y calcio).

Adsorción en una superficie sólida: Los procesos de adsorción involucran la transferencia de soluto en la corriente de gas a una superficie de un material

sólido, que se concentra principalmente como resultado de las fuerzas físicas de Van der Waals. Los adsorbentes comerciales son generalmente sólidos granulares con grandes áreas superficiales por unidad de volumen. A partir de una buena elección del adsorbente, el proceso puede remover CO_2 , H_2S , humedad y otras impurezas selectivamente o simultáneamente desde el biogás. La purificación del biogás se puede también llevar a cabo usando alguna forma de silicio, alúmina, carbón activado o silicatos, que son también conocidos como tamices moleculares. La adsorción normalmente se lleva a cabo a alta temperatura y presión. Tiene una buena capacidad para remover la humedad, tiene un diseño simple y es fácil de operar. Pero es un proceso costoso, con altas caídas de presión y altos requerimientos de calor.

Separación por membrana: El principio de esta técnica es que algunos componentes del gas crudo pueden ser transportados a través de una membrana delgada (menor a 1 mm) mientras que otros son retenidos. El transporte de cada componente se debe a la diferencia de presión parcial sobre la membrana y depende ampliamente de la permeabilidad del componente en el material de la membrana. Para alta purificación de metano, la permeabilidad debe ser alta. Una sola unidad de separación de fases no puede proporcionar una completa separación de metano y dióxido de carbono y típicamente la baja presión del gas de salida (dióxido de carbono enriquecido) puede contener tanto como 12% v/v de metano. El producto de gas contiene alrededor de 88% v/v de metano. Sin embargo, los procesos de separación multietapas pueden lograr 98% v/v aunque la presión necesaria para esta operación puede ser tan alta como 4 MPa. La membrana sólida construida a partir de polímeros de celulosa-acetato tiene una permeabilidad para el CO_2 y el H_2S de 20 y 60 veces, respectivamente, superiores al CH_4 . Sin embargo, se requiere para este proceso una presión de 25-40 bar.

Separación criogénica: El método criogénico de separación implica la separación de la mezcla de gas por condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas. En la separación criogénica, el biogás crudo es comprimido a aproximadamente 80 bar. La compresión se realiza en múltiples etapas. El gas comprimido se seca para evitar que se congele durante el proceso de enfriado. El biogás es enfriado en intercambiadores y el CO_2 condensado es removido en un separador. El CO_2 es además procesado para recuperar el metano disuelto, que es reciclado a la entrada del gas. A partir de este proceso se obtiene más de 97% de metano puro. No hay datos disponibles sobre costos operacionales y de inversión.

Método de conversión química: Este método se utiliza cuando se quiere obtener una alta purificación en el gas producido. Esto reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas. Normalmente el método de conversión química se utiliza luego de una buena remoción lograda con otros métodos. Uno de dichos procesos de conversión es la metanización, por el cual el CO_2 y el H_2 son convertidos catalíticamente en metano y agua. El proceso de conversión química es muy caro.

2.2.2 Eliminación de H_2S

Proceso seco de oxidación: Se utiliza para remover H_2S de una corriente de gas que puede convertirse en azufre u óxido de azufre. Este proceso se usa cuando el contenido de azufre del gas es relativamente bajo y se requiere una alta pureza. Algunos de estos métodos son: *introducción de aire/hidrógeno dentro del sistema de biogás y adsorción química.*

El primero es un proceso simple y de bajo costo. No se necesitan químicos ni equipamientos especiales. Dependiendo de la temperatura, el tiempo de reacción y el lugar donde el aire se agrega, la concentración de H_2S se puede reducir en un 95% a menos de 50 ppm.

En el segundo método el H_2S reacciona con óxido de hierro u óxidos para formar sulfuro de hierro. El biogás pasa a través de pelotitas de óxido de hierro para remover el H_2S . Cuando las pelotitas se cubren completamente con sulfuro, son removidas desde el tubo para la regeneración del sulfuro. Las esponjas de hierro son tecnologías muy utilizadas en algunos lugares ya que se pueden reducir los niveles de H_2S desde 3600 ppm a 1ppm [3]. Si bien las esponjas de hierro presentan beneficios tales como la operación simple y efectiva, hay desventajas críticas a esta tecnología que han llevado a la disminución de su uso en los últimos años. Este proceso es altamente químico-intensivo, los costos de operación pueden ser altos, y además se puede acumular una corriente continua de material de desecho agotado. Tal vez lo más problemático sea la eliminación segura de las esponjas de hierro agotadas, ya que en algunos casos pueden ser considerados como residuos peligrosos que requieran procedimientos especiales de tratamiento. Recientemente, propietarios de medios de óxidos de hierro, tales como SulfaTreat®, Azufre-Rite® y Media-G2®, han ofrecido alternativas mejoradas de esponjas de hierro. Una descripción detallada de estas tecnologías es presentada por McKinsey Zicari. [3]. La adsorción química también puede llegar a tener como adsorbente el carbón activado. Existen tres tipos básicos de carbón activado: catalizador impregnado (el cual se puede regenerar), carbones impregnados y carbones no impregnados (vírgenes). Otro sistema comercialmente llamado GAS RAP® tiene la capacidad de limpiar el H_2S dentro de la entrada

del gas suministrado a niveles inferiores de entre 25 y 50 ppm. Esta tecnología aparece como la más costo-efectiva para gas de basural con altas concentraciones de H_2S (mayores a 2000 ppm v/v).

Procesos de oxidación en fase líquida: Este proceso se usa para el tratamiento de gases que contienen relativamente bajas concentraciones de H_2S . Este puede ser un proceso de absorción físico o un proceso de absorción químico. En los procesos de absorción físicos el H_2S puede ser absorbido por el solvente. Uno de los solventes es el agua. Pero el consumo de agua es muy alto para la absorción de pequeñas cantidades de H_2S . Si algunos químicos, como el NaOH, son agregados al agua el proceso de absorción es mejorado. Esto forma sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio, que no se regenera y genera residuos líquidos. En la absorción química del H_2S los químicos usados pueden ser sólidos o líquidos y pueden ser aplicados en torres de contacto batch o pueden inyectarse directamente a la cañería de gas. El subproducto de la reacción es generalmente separado y tratado como desecho. El producto químico es consumido y el absorbente puede ser regenerado.

En un estudio a escala piloto [4], se utilizó una solución de Fe-quelato a temperatura ambiente y bajas presiones, que funcionaba en un equipo a contracorriente para la remoción de H_2S . Este trabajo tuvo como objetivos: presentar una preparación más confiable de la solución Fe-quelato; demostrar la mayor capacidad de absorción y la eficacia del método en comparación con la adsorción de agua pura; y producir datos para el cálculo de expansión y evaluación tecn-económica del proceso. A bajas presiones y altos caudales la remoción puede llegar a ser del 100%. Sin embargo, hasta el momento no se conocen los usos industriales, y la probabilidad de ver el proceso aplicado parece ser bastante baja.

Separación por membranas: Cosoli et al. [5] realizaron un trabajo para estudiar la remoción de H_2S a partir de corrientes de biogás con diferentes zeolitas. Los principales resultados de este trabajo confirmaron que las zeolitas hidrofílicas son más indicadas para la adsorción de H_2S . Las isothermas de adsorción, el calor isotérmico de adsorción y la distribución de energía confirman las tendencias específicas y explican el comportamiento de adsorción. Por otra parte, Harasimowicz et al. [6] demostraron que usando módulos capilares con membranas de poliamida era posible lograr el enriquecimiento de CH_4 desde concentraciones de 55-85% a 91-94%. El material de la membrana es resistente a bajas concentraciones de gases ácidos y asegura la reducción de H_2S y la concentración de vapor de agua también.

Procesos de lavado: Couvert et al. [7] publicaron recientemente resultados de un lavador compacto usado para eliminar H_2S , mercaptanos y NH_3 de emisiones

gaseosas de una planta de tratamiento de aguas residuales. Con este proceso se puede llegar a eficiencia de remoción superior al 99.5% de H_2S , para velocidades de gas superficial mayores a 15 m/s y con velocidades de líquido superficial mayores a 4 m/s. Sin embargo, este método presenta una serie de inconvenientes al ser aplicados en la purificación de biogás, por lo que el método debe continuar estudiándose para su aplicabilidad en este tipo de procesos.

Procesos biológicos: Una revisión de diferentes métodos de remoción de H_2S usando procesos biológicos fue realizado por Syed et al. [8]. En dicho trabajo se concluye que la elección del método de tratamiento adecuado dependerá de la fuente de la que provenga el gas. En el caso de H_2S en el biogás, los métodos que utilizan bacterias anaerobias fototróficas tienen la ventaja inherente de mantener el carácter anaeróbico del gas y evitar cualquier potencial problema de seguridad. *Cholorobium limicola* es una bacteria que es aconsejable usar debido a su crecimiento utilizando sólo sustratos inorgánicos, a la eficiencia en la conversión de sulfuro a azufre elemental, y a la producción extracelular de azufre elemental. Los reactores de película fija tienen un mayor potencial para una conversión más costo-efectiva de sulfuro, debido al reducido requerimiento para la separación de la biomasa y a la capacidad para alcanzar mayores cargas. Si la luz se controla correctamente, el producto de la oxidación es en gran medida azufre, que no es tóxico ni corrosivo.

2.2.3 Eliminación de especies orgánicas halogenadas y siloxanos

Actualmente no hay un método universal para el tratamiento de biogás para eliminar o minimizar los siloxanos. Sin embargo, están disponibles varios procesos que son capaces de tratar muchos compuestos halogenados. Estos procesos tienen además un efecto adicional en la limpieza del dióxido de carbono y otros compuestos traza. Algunos de los métodos de eliminación de CO_2 y H_2S , ya explicados en este resumen, que también pueden aplicarse en especies halogenadas son: *Separación por membranas*, *Procesos de balance de presión*, *Procesos criogénicos*. Por otra parte Prabucki et al. [9] describen tres métodos para remover orgánicos, manifestando que son capaces de reducir el gas tratado a menos de 1 mg/m^3 de siloxanos.

Un proceso que está siendo actualmente desarrollado a escala piloto en el Reino Unido, que remueve tanto compuestos halogenados como siloxanos, es el *Proceso de limpieza líquido absorción/solvente* en el cual se utiliza aceite de hidrocarburo como solvente. Los componentes traza en el gas de basural se remueven parcialmente en una torre en contra corriente por la que fluye el solvente de aceite. El aceite contaminante se regenera en la torre de arrastre al vacío y

el contaminante gaseoso es eliminado. Los resultados a escala piloto mostraron exitosas reducciones en la concentración de compuestos clorados y siloxanos.

En el 2001, Schweigkofler y Niessner [10] publicaron un estudio relacionado con la remoción de siloxanos del biogás. Se realizaron exámenes de laboratorio para comparar la extracción con reactivos líquidos y técnicas de adsorción con sólidos. En el mismo trabajo los autores investigaron varias técnicas de remoción de siloxanos con adsorbentes en fase sólida (adsorción en carbón activado, tamiz molecular, aluminio, gel de sílice y pellets de polímero). Las conclusiones fueron:

- La capacidad de absorción depende en gran medida del tipo de siloxano, lo cual significa que la composición de siloxanos debe ser ampliamente tenida en cuenta.
- Algunos siloxanos se absorben muy bien en todos los adsorbentes testeados.
- El gel de sílice resultó ser el más eficiente de los adsorbentes testeados, pero debe ser considerado el secado del gas. Si el gas se encuentra cerca de la saturación, este método debe ser aplicado en dos etapas: secado seguido por la remoción de siloxano. La regeneración de este gel ha sido posible mediante tratamientos térmicos a 250°C durante 20 min. Casi el 95% del siloxano es desorbido, pero varía la eficiencia con la volatilidad del siloxano. En consecuencia, la eficiencia de adsorción del gel, así como de todos los adsorbentes ensayados se espera que disminuya luego de cada ciclo de regeneración.

Recientemente, en diciembre de 2007, fue patentado [11] un lecho regenerable de alúmina activado para eliminar siloxano. De acuerdo con esta invención, el biogás liberado de las plantas de tratamiento de aguas residuales se libera del siloxano al pasar a través de un lecho con alúmina activada, el cual lo absorbe. Cuando la alúmina activada se satura con siloxanos, su capacidad de absorción se puede recuperar haciendo pasar un gas de regeneración a través del lecho. Un sistema que contiene dos o más lechos de alúmina activada puede usar un lecho para eliminar siloxanos del biogás, mientras que uno o más de los otros lechos están en proceso de regeneración.

3. Aportes: Comparación de los tratamientos

De la comparación de los diferentes tratamientos surge, como muy interesante de estudiar, el de absorción física. Por ello se presenta una discusión más profunda.

3.1 Comparación de los diferentes tratamientos secundarios

En la Tabla 1 se comparan las principales características de las tecnologías de tratamiento secundario actualmente disponibles para la purificación de biogás.

Tabla 1. **Comparación de los tratamientos secundarios**

Tratamiento Secundario	Diseño	Operación	Costo de Inversión	Costo de Operación	Calidad del tratamiento
Absorción física	Muy Sencillo	Muy Sencilla	Bajo	Bajo	Alta eficiencia de purificación. En algunos casos se obtiene metano puro.
Absorción química	Muy Sencillo	Sencilla	Bajo	Medio	Principalmente se utiliza para remover CO ₂ , H ₂ S y vapor de agua. La eficiencia es alta aunque varía en función del compuesto químico utilizado.
Adsorción en una superficie sólida	Sencillo	Sencilla	Medio	Alto	A partir de una buena elección del absorbente, el proceso puede remover CO ₂ , H ₂ S, humedad y otras impurezas simultánea o selectivamente.
Separación por membrana	Normal	Normal	Medio	Alto	Para alta purificación de metano, la permeabilidad debe ser alta. Aunque los procesos de separación multietapas pueden lograr 98% v/v de metano.
Separación criogénica	Normal	Normal	No hay datos disponibles	No hay datos disponibles	El proceso tiene la ventaja de que permite la recuperación de los componentes puros en forma líquida, que puede transportarse fácilmente. Aunque no presenta alta eficiencia en la remoción de CO ₂ .
Método de conversión química	Complejo	Complejo	Muy alto	Muy alto	Reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas.
Procesos de oxidación	Muy Sencillo	Muy Sencillo	Bajo	Bajo	Solo presenta alta eficiencia en la eliminación de H ₂ S y en algunos casos de vapor de agua.

3.2 Selección y análisis del método más conveniente de purificación actualmente disponible

El método más sencillo, económico y simple para la eliminación de impurezas del biogás es el que se basa en la absorción física, utilizando agua presurizada como absorbente. En la Tabla 2 se presentan los principales ejemplos de este método y en la Figura 1 algunos esquemas de tratamiento con agua.

Tabla 2. Principales alternativas de purificación de biogás por absorción acuosa

Autor	Unidad utilizada	Características del proceso	Eficiencia de purificación
Bhattacharya et al. (1988) [13]	Torre de purificación	Factores que afectan el proceso: <ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones de la torre de purificación • Presión del gas • Composición del biogás puro • Tasa de flujo de agua • Pureza del agua usada 	100% (obtención de metano puro)
Khapre (1989) [13]	Limpiador contra-corriente continuo	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de gas: 1.8 m³.h⁻¹ • Presión: 0.48 bar • Tasa de inlfujo de agua: 0.465 m³.h⁻¹ 	Reducción de CO ₂ desde 30% hasta 2%
Dubey (2002) [14]	Tres limpiadores de agua con diámetros de 150 mm (altura: 1.5 m), 100 mm (altura: 10 m) y 75 mm (altura: 10 m)	Factores que afectan el proceso: <ul style="list-style-type: none"> • Tasa de flujo de gas y agua de los diferentes diámetros de los limpiadores 	Reducción de CO ₂
Shyam (2002) [15]	Torre de purificación de 6 m de alto, empacada con 2.5 m de altura con bolas de plástico esférico de 25 mm de diámetro	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de flujo: 2 m³.h⁻¹ • Presión: 5.88 bar 	Reducción del 87.6% de CO ₂
Henrich (1983) Figura 1a [16]	<i>Sistema Binax Básico:</i> consiste de dos torres, una para purificar el biogás con agua presurizada y otro para remover los contaminantes del agua, por lo que el agua puede ser recirculada.	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de flujo: de 300 m³.h⁻¹ a 1770 m³.h⁻¹ • Presión de entrada: desde unas pocas pulgadas de columna de agua hasta un psig. 	El gas producido contiene más del 98% de metano y menos del 2% de dióxido de carbono.

(Continúa)

Autor	Unidad utilizada	Características del proceso	Eficiencia de purificación
Henrich (1983) Figura 1b [16]	<i>Sistema Binax "Once Thru"</i> : En este sistema la torre de regeneración se elimina	<ul style="list-style-type: none"> • Se aplica en plantas de tratamiento de efluentes que tienen un tratamiento secundario. • El flujo continuo de agua de la planta secundaria pasa una vez por el sistema y es descargado en el recipiente de la planta de aireación. • Tasa de flujo: de 300 m³.h⁻¹ a 1770 m³.h⁻¹ • Presión de entrada: desde unas pocas pulgadas de columna de agua hasta 1 psig. 	El gas producido contiene más del 98% de metano y menos del 2% de CO ₂
Rasi et al (2008) Figura 1c [17]	Unidad a escala piloto: Columna de absorción rellena (500 lt, altura 185 cm, diámetro 60 cm), columna de desorción (500 lt, altura 155 cm, diámetro 65 cm), tanque de almacenamiento de agua (500 lt)	<ul style="list-style-type: none"> • Caso 1: tasa de flujo 10 lt.min⁻¹, presión 20 bar • Caso 2: tasa de flujo 5 lt.min⁻¹, presión 30 bar 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de CO₂ final: 3.2% a 4.8%. • Contenido de metano: > 90% • El H₂S disminuyó por debajo del límite de detección
Vijay et al (2006) [18]	Torre de purificación de 150 mm de diámetro, con lecho empacado de 3500 mm de alto	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de flujo: 1.5 m³.h⁻¹ • Presión de entrada: 1.0 MPa 	Remoción del 99% de CO ₂

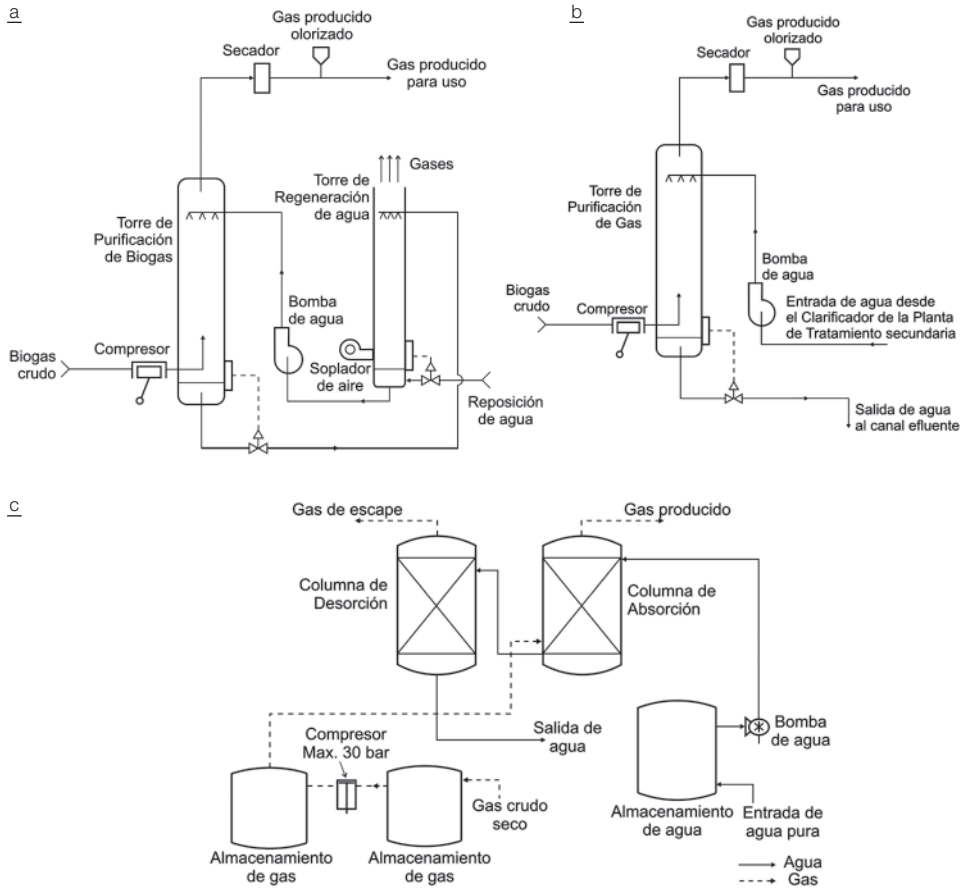


Fig. 1. Esquemas de purificación de biogás por absorción acuosa

4. Conclusiones

En el presente trabajo se revisaron diferentes métodos de purificación de biogás. El proceso de limpieza con agua es un método fácil y económico y permite la eliminación tanto del CO_2 como del H_2S que son las principales impurezas presentes en el biogás. De esta forma el biogás se convierte en un equivalente al gas natural aumentando su potencial empleo como combustible para diferentes usos. Además su aplicabilidad permitiría ampliar la diversidad y la sustentabilidad de la matriz energética actual.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo económico de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Referencias

- [12] T.K. Bhattacharya, T.N. Mishra, B. Singh, Techniques for removal of CO₂ and H₂S from biogas, paper presented at XXIV annual convention of ISAE, Akola, 1988.
- [5] P. Cosoli, M. Ferrone, S. Pricl, M. Fermeglia, Hydrogen sulphide removal from 1 biogas by zeolita 2 adsorption. Part I: GCMC molecular simulations, *Chemical Engineering Journal* (2007) 1-23.
- [7] A. Couvert, C. Sanchez, A. Laplanche, C. Renner, Scrubbing intensification for sulphur and ammonia compounds removal, *Chemosphere* 70 (2008) 1510–1517.
- [14] A.K. Dubey, Wet scrubbing of carbon dioxide, *Tech. Rep.*, CIAE, Bhopal, India, 2002.
- [1] Environment Agency, 2002. Guidance on Gas Treatment Technologies for Landfill Gas Engines, *Tech. Rep.*, External Consultation Draft. Environment Agency, Bristol.
- [6] M. Harasimowicz, P. Orluk, G. Zakrzewska-Trznadel, A.G. Chmielewski, Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment, *Journal of Hazardous Materials* 144 (2007) 698–702.
- [16] R.A. Henrich, Advances in Biogas to fuel conversion, *Tech. Rep.*, Central Plants Inc. Commerce, CA, 1983.
- [11] V.L. Higgins, Siloxane removal process, US Patent 7.306.652, Assignee Parker-Hannifin Corporation, 2007.
- [11] M.S. Horikawa, F. Rossi, M.L. Gimenes, C.M.M. Costa, M.G.C. Silva, Chemical absorption of H₂S for biogas purification, *Brazilian J Chem Eng* 21 (2004) 415–422.
- [20] S.S. Kapdi, V.K. Vijay, S.K. Rajesh, R. Prasad, Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context, *Renewable Energy* 30 (2005) 1195–1202.

- [13] U.L. Khapre, Studies on biogas utilization for domestic cooking, paper presented at XXV annual convention of ISAE, 1989.
- [3] S. McKinsey Zicari, Removal of hydrogen sulphide from biogas using cow manure compost, *Tech. Rep.*, Faculty of the Graduate School of Cornell University, 2003.
- [9] M.J. Prabucki, W. Doczyck, D. Asmus, Removal of organic silicon compounds from landfill and sewer gas, in Proceedings Sardinia 2001 Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, CISA, Volume II (2001) 631-639.
- [17] S. Rasi, J. Läntelä, A. Veijanen, J. Rintala, Landfill gas upgrading with countercurrent water wash, *Waste Management* 28 (2008) 1528–1534.
- [10] M. Schweigkofler, R. Niessner, Removal of siloxanes in biogases, *J Hazard Mater* B83 (2001) 183–196.
- [15] M. Shyam, Promising renewable energy technologies, AICRP technical bulletin number CIAE/2002/88 (2002) 47–48.
- [8] M. Syed, G. Soreanu, P. Falletta, M. Béland, Removal of hydrogen sulphide from gas streams using biological processes – A review, *Can Biosyst Eng* 48 (2006) 1–2.14.
- [18] V.K. Vijay, R. Chandra, P.M. Subbarao, S.S. Kapdi, Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications, *Proceedings of the 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)*, 2006.

