

Purificación del biogás para su uso en motores

Biogas purification for its use in engines

Shadir Sánchez Hernández^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

*Correspondencia: renia@tesla.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

El transporte en Cuba es uno de los sectores de mayor dependencia de importaciones de combustibles fósiles, específicamente de combustible diesel. El empleo de biocombustibles en transporte automotor o en grupos electrógenos es una vía factible para reducción de contaminación ambiental y a su vez generar energía limpia útil como contribución al desarrollo. En el presente trabajo se realiza un análisis de la literatura para establecer los principales elementos a considerar para poder emplear un motor alimentado por biogás, desde su composición y purificación hasta su uso en motores de combustión interna.

Palabras clave: biogás, motores de combustión interna, purificación, metano

Abstract

Transportation in Cuba is one of the most dependent sectors on fossil fuels imports, mainly diesel fuel. The use of biofuels in transportation or small power stations is an effective pathway for pollution reduction and to generate clean energy as a contribution to the development. In this work an analysis of the state of arts in this field is implemented, in order to establish the main elements to consider from the implementation of the use of biogas in engines, covering from its chemical composition and purification system to their proper use in internal combustion engines.

Keywords: biogas, internal combustion engines, purification, methane

1. Introducción

La energía eléctrica es una cuestión de vital importancia en el desarrollo socioeconómico de cualquier sociedad y se encuentra en creciente demanda, mientras que la producción y las reservas de combustibles fósiles tienen una tendencia a su agotamiento a mediano plazo, por lo que se han buscado soluciones alternativas, como son el uso de las fuentes renovables de energía, tales como la biomasa, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz y solar. También ha sido una solución el aprovechamiento del biogás, el cual es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores [1].

El biogás es un recurso abundante, renovable y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al combustionar el metano presente en su composición y al reemplazar fuentes de energía a base de combustibles fósiles. La producción de biogás por descomposición anaerobia es un proceso

considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un biocombustible de valor, además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. De cualquier manera, debe puntualizarse que el empleo del biogás como alternativa energética parte de la necesaria reducción del impacto ambiental que generan los residuales, más allá de que sea aprovechado como alternativa energética [2].

Este gas, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, almacena una considerable cantidad de energía que puede ser aprovechada mediante la combustión en diferentes procesos en motores de combustión interna (MCI), lámparas de iluminación, quemadores domésticos e industriales, calderas y en sistemas de refrigeración, mediante tecnologías apropiadas que, además, aliviarían efectos ambientales adversos que el biogás puede producir cuando es descargado a la atmósfera sin una depuración adecuada. Aunque el desarrollo investigativo y la transferencia de tecnología no han tenido una alta resonancia a nivel nacional e internacional comparado con otras fuentes renovables de energía, su potencial e importancia es grande. Una de las alternativas de usos del biogás producido es su combustión en MCI. Sin embargo, esta alternativa tiene requerimientos mínimos para su empleo, con máximo aprovechamiento de la energía, así como reducción del impacto en los MCI [3-6]. El objetivo del presente trabajo es explorar las condiciones de uso de biogás en MCI en la solución de problemas derivados de altas demandas de energía y de altas producciones de materiales orgánicos, principalmente en el sector de la ganadería porcina.

2. Propiedades físico-químicas del biogás

Composición química del biogás

El gas producido en el proceso de descomposición anaerobia, más conocido como biogás, transforma la materia orgánica en proporciones que varían entre 10 a 40%, dependiendo de las formas y sistemas de control a los cuales esté sujeta su estabilización, ya sea en condiciones naturales o activadas por el hombre.

La composición química del biogás depende primordialmente de dos factores: los materiales empleados en la digestión y la tecnología utilizada para el proceso. Teniendo eso en cuenta, el biogás se compone de metano (del 50 al 75% en volumen), dióxido de carbono (del 20 al 50% v/v), sulfuro de hidrógeno (del 0,01 al 0,4% v/v) y trazas de amoníaco (NH_3), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2) y monóxido de carbono (CO); además contiene sustancias volátiles. Un ejemplo de la composición del biogás de una planta de biogás promedio que utiliza estiércol es: metano 60% v/v, dióxido de carbono 38% v/v, gases residuales 2% v/v [7].

Propiedades físicas del biogás

El biogás posee un conjunto de características y propiedades que lo hacen único y que le permiten ser un sustituto de los combustibles fósiles. La densidad del biogás puede variar en función de su composición, contenido de humedad y temperatura. Debido a esto, puede llegar a ser más pesado que el aire, pero lo normal es que sea más ligero que este. Esta propiedad se debe tener en cuenta a la hora de determinar medidas de protección.

El biogás tiene como promedio un contenido calorífico entre 18,8 y 23,4 MJ/m^3 y una temperatura de ignición de aproximadamente 700°C. Debido a esto el Sistema Global de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA) describe al biogás como un gas extremadamente inflamable y debería mantenerse alejado del calor, superficies calientes, chispas, llamas al descubierto y otras fuentes de

ignición. Su almacenamiento debe ser en un recipiente herméticamente cerrado y en un lugar bien ventilado.

En la Tabla 1 se muestran las propiedades principales del biogás y su comparación con otros gases que también se suelen utilizar con fines energéticos [8].

Tabla 1. Propiedades de varios gases combustibles

	Biogás (60% CH₄)	Gas natural	Propano	Metano	Hidrógeno
Poder calorífico (kW/m ³)	6	10	26	10	3
Densidad (kg/m ³)	1,2	0,7	2,01	0,72	0,09
Densidad con respecto al aire	0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Temperatura de ignición (°C)	700	650	470	595	585
Vel. máx. de propagación de la llama en el aire (m/s)	0,25	0,39	0,42	0,47	0,43
Rango de explosividad (% v/v)	6-22	4,4-15	1,7-10,9	4,4-16,5	4-77
Consumo de aire teórico (m ³ /m ³)	5,7	9,5	23,9	9,5	2,4

Requisitos físico-químicos para su uso en MCI

Para emplear gases combustibles en MCI es necesario cumplir con determinadas exigencias de tipo físico-químicas. Son muy importantes, entre otras el poder calórico, los límites de combustión y el límite de detonación. Lógicamente, el gas debe cumplir otras propiedades que garanticen el funcionamiento del motor en cuanto a temperatura y presión. Del motor se debe tener en cuenta, la relación de compresión y la relación aire-combustible, si va a ser mezclado con combustible estándar y en caso de ser motor tipo diesel el tiempo de retardo de la ignición, dependiente de la composición del biocombustible [9, 10].

Para utilizar el biogás en motores de combustión interna, desde el punto de vista físico-mecánico, se hace necesaria la eliminación de la mayor cantidad de vapor de agua y gas sulfhídrico que contiene como impurezas, para aumentar la concentración de metano y el bajo contenido calorífico. Además, se debe tener en cuenta que la presencia de dióxido de carbono en el gas de combustión incrementa las pérdidas en los sistemas de escape del motor, por ser un gas que no contribuye en la combustión.

También se debe garantizar mediante el uso de válvulas, una presión máxima a la entrada de 8 bar y a la salida de la cámara de combustión de 2-3 bar. Atendiendo a la temperatura de suministro del gas en el motor, esta no debe superar los 60°C. Con esto, aunque incrementa la temperatura al final del proceso de compresión, hace disminuir el rendimiento volumétrico del motor [11].

Cuando se emplean gases combustibles en MCI es necesario tener en cuenta la presencia de gases nocivos dentro de la mezcla gaseosa que conforma el combustible. En el biogás, es muy común la presencia de H₂S en la mezcla gaseosa. Este componente puede en ocasiones superar el 1% en volumen, concentración que se considera elevada. Con esta concentración, el biogás se considera corrosivo y ocasiona severos daños al motor [12].

El efecto corrosivo se acentúa cuando el motor no funciona de forma continua. Al producirse el enfriamiento del motor se condensa el vapor de agua, formando junto al ácido sulfhídrico el ácido

sulfúrico (H_2SO_4) que es altamente corrosivo. El ácido sulfúrico, ataca la superficie de los materiales ferrosos con que se construyen las cámaras de combustión de los motores, se incrementa el desgaste y se pierde la hermeticidad de los cilindros; también ataca los cojinetes del motor pudiendo destruirlo en poco tiempo.

El SO_2 que se forma durante la combustión y que está presente en los gases de escape, forma una solución con el vapor de agua que posteriormente emulsiona el aceite. En estas condiciones el lubricante pierde entre otras propiedades su capacidad de lubricar, tornándose ácido y corrosivo. Por este motivo, el tiempo de trabajo de los motores que utilizan combustibles gaseosos que contienen H_2S debe reducirse entre un 10-16% del tiempo normal de servicio y de igual forma se acortan los intervalos para el cambio de aceite. Sin embargo, la presencia de H_2S no solo afecta al motor, sino también un conjunto de accesorios como válvulas, reguladores de presión, grifos, etc., los cuales se construyen de materiales no ferrosos que se deterioran muy rápidamente cuando se forman los ácidos.

Otro de los problemas es la presencia de CO_2 . Como es conocido, este gas constituye un lastre dentro de la mezcla, pues ocupa un volumen apreciable (hasta un 35% en el biogás) y no produce aporte energético durante la combustión, sino que solamente consume parte de la energía liberada durante este proceso para incrementar su temperatura. El CO_2 sin embargo se considera por muchos autores como un elemento beneficioso dentro del biogás, pues permite elevar el poder antidetonante de la mezcla, posibilitando utilizar elevadas relaciones de compresión [13]. Dado el alto contenido CO y CO_2 , el biogás tiene un octanaje de 115 a 125. El uso del biogás en motores de combustión interna permite que se soporten altas compresiones sin detonaciones [14]; por este motivo, puede utilizarse un coeficiente de compresión más elevado para el motor, de modo que para un mismo volumen útil se alcanza con la utilización del gas una potencia similar a la que se obtiene con el uso de los combustibles convencionales [15].

En la Tabla 2 se muestran los requisitos mínimos de calidad que debe tener el biogás para su empleo como combustible en un motor diesel. En el caso del dióxido de carbono, lo recomendable es eliminarlo, pero es a porcentajes mayores que 40% que comienza a evidenciarse la pérdida de potencia en el motor.

Tabla 2. Requisitos mínimos de calidad para la utilización de biogás en motores diesel

Parámetros	Valores	
Presión (bar)	2-3	
Temperatura ($^{\circ}C$)	10-50	
Composición (%)	CO_2	40
	H_2S	0,2
Humedad relativa (%)	60	

Biogás a partir de residuales porcinos

La cría comercial de animales como alimento para la población tiene como una de sus principales limitaciones el fuerte impacto que causa al medio ambiente la deposición de sus residuos sin un tratamiento que reduzca su carga orgánica.

El tratamiento anaerobio de estos residuos es una de las soluciones más extendidas para la reducción de su carga orgánica. Como resultado de esta aplicación, se obtiene, independientemente de la tecnología que se utilice, biogás y bioabonos.

Según el Instituto de Investigaciones Porcinas de Cuba [16], si analizamos el potencial de generación de electricidad con biogás en los sectores pecuarios, se aprecia un potencial de más de 245 GWh al año y se destaca el sector porcino con alrededor de 90 GWh [17]. Esto demuestra la necesidad de inversiones para aprovechar este potencial energético y reducir su impacto.

Las producciones potenciales de biogás y la calidad de este dependen de diversos factores como: peso vivo del animal, categoría, tipo de alimentación, temperatura media ambiental, tiempo de retención hidráulica, características y estado del biodigestor, entre otras. Teniendo esto en cuenta se dan como promedio en Cuba los siguientes indicadores de calidad del biogás, determinados por el porcentaje de gases componentes: CH₄: 56%, CO₂: 42%, H₂S: 1,6%.

Estas concentraciones se consideran inadecuadas para la utilización del biogás en motores diesel, de acuerdo a los parámetros críticos mencionados en apartados anteriores. Por esta razón, se le debe aplicar algunos de los métodos de purificación al biogás.

Para la evaluación del potencial energético del biogás en el caso de Cuba se considera: contenido de CH₄ de 60%, poder calórico de 23 MJ/m³ e índice de generación de electricidad de 1,8 kWh/m³, este último considerando su empleo en grupos electrógenos.

3. Métodos y tecnologías para la purificación del biogás

El biogás (CH₄-CO₂) no es puro, puesto que contiene partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tendrá.

La purificación del biogás es importante por dos razones principales:

- Para aumentar el contenido calorífico del biogás
- Cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.).

Los propósitos de purificación y/o acondicionamiento del biogás se resumen en la Figura 1. El “tratamiento completo” implica que se elimina gran parte del CO₂, vapor de agua y otros gases traza del biogás, mientras que el “reformado” es la conversión de metano en hidrógeno. Para la remoción de gases en traza, los procesos comunes son el lavado, adsorción y secado [8].

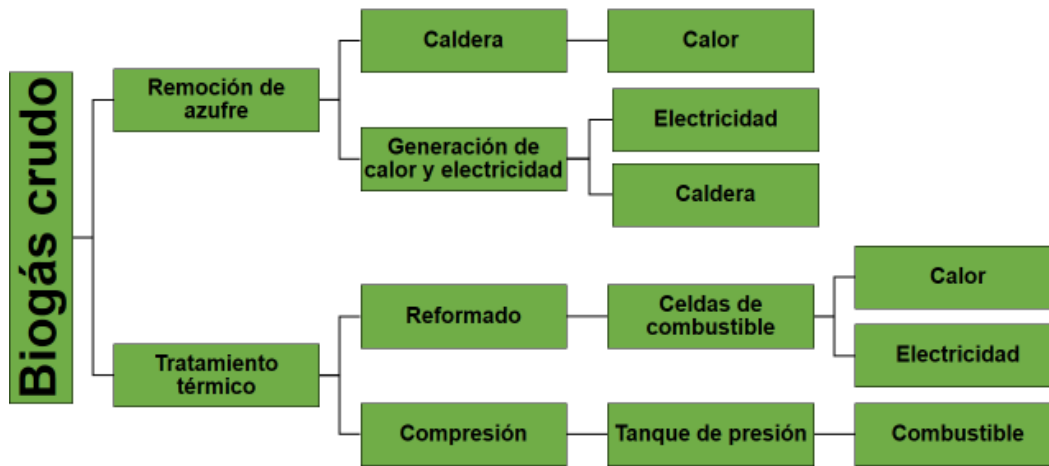


Fig.1 Usos y requisitos de acondicionamiento del biogás

Remoción del dióxido de carbono

Un biogás enriquecido de metano es aquel que presenta una concentración de metano superior a 95%. Para alcanzar esta concentración, el CO₂ debe ser removido. El procedimiento para la remoción de CO₂ debe seleccionarse según los siguientes criterios:

- Concentración mínima requerida
- Bajo consumo de material absorbente o adsorbente (ej. fácil regeneración, estabilidad química y térmica)
- Que no genere impactos ambientales significativos
- Que esté fácilmente disponible y a bajo costo

Para la mayoría de las aplicaciones más simples de biogás tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción del CO₂ del biogás no es necesaria y el CO₂ simplemente pasa a través del quemador o motor. La remoción del CO₂ incrementa el poder calorífico y genera un gas de calidad similar a la del gas natural. El CO₂ puede removerse del biogás mediante procesos de absorción o adsorción. Otros procesos disponibles son las separaciones por membrana y criogénicas.

Para eliminar el CO₂ y H₂S del biogás se puede utilizar un lavado a presión contracorriente con agua. Para la remoción de CO₂, en particular, los factores críticos son pH, presión y temperatura. Para incrementar el lavado del CO₂ desde el biogás debe haber condiciones de alta presión, baja temperatura y pH alcalino. El uso de soluciones de Ca(OH)₂ puede remover completamente el CO₂ y H₂S. Estos gases son más solubles en algunos solventes orgánicos tales como polietilenglicol, que no disuelven el metano. Estos solventes orgánicos pueden por lo tanto, ser usados para lavar estos gases. Los sistemas que utilizan este tipo de solventes orgánicos pueden remover el CO₂ del biogás hasta valores por debajo

de 0,5%. Sin embargo, el uso de solventes orgánicos es mucho más costoso que los sistemas de lavado con agua.

La adsorción de CO₂ sobre sólidos tales como carbón activado o tamices moleculares es factible, aunque requiere mayor temperatura y presión. Estos procesos pueden no ser costo-efectivos debido a las altas temperaturas y presiones asociadas.

La separación criogénica es otro proceso posible, debido a que a presión atmosférica el metano presenta un punto de ebullición de -106°C, mientras que el CO₂ presenta un punto de ebullición de -78°C. Por lo tanto, la condensación y destilación fraccionada a bajas temperaturas puede separar el metano puro en forma líquida, la cual es conveniente para el transporte. Mediante este proceso se puede obtener un metano de hasta 97% de pureza, pero el proceso requiere altas inversiones iniciales.

Las membranas o tamices moleculares dependen de las diferencias en la permeabilidad de los componentes individuales del gas a través de una membrana fina. Las separaciones por membrana están adquiriendo una creciente popularidad. Existen otras alternativas por conversión química, pero estas tecnologías aún no son viables del punto de vista económico.

Absorción

El metano y el dióxido de carbono presentan afinidades distintas a diversos líquidos. En el agua, como agente de lavado, los componentes ácidos del biogás tales como CO₂, son disueltos más fácilmente que los componentes hidrofóbicos apolares tales como los hidrocarburos. La absorción física puede explicarse por diferentes fuerzas de Van der Waals de los gases y la absorción química mediante diferentes enlaces covalentes.

Un absorbente para el lavado con agua presurizada consta de una columna rellena con material de empaque, el cual es precolado con agua fresca. El biogás comprimido a 10-12 bar es alimentado por la parte inferior de una columna, mediante un flujo ascendente pasa a través del material de empaque y así transfiere el CO₂ al agua (5-25°C). El biogás sale por la parte superior de la columna con una concentración de metano mayor a 95%. Otros absorbentes muy empleados incluyen mezclas de dimetil éter y polietilenglicol, particularmente porque no son tóxicos ni corrosivos.

Adsorción por la variación de presión

Esta tecnología permite obtener un metano muy puro y se basa en el hecho de que bajo ciertas presiones, los gases tienden a ser atraídos hacia superficies sólidas (adsorbidos); mientras mayor sea la presión, una mayor cantidad de gas será adsorbido y cuando se reduce la presión, el gas es liberado o desorbido. Este proceso puede utilizarse para separar gases en una mezcla, debido a que los diferentes gases tienden a ser atraídos con mayor o menor afinidad en diferentes superficies sólidas.

Se pueden emplear como adsorbentes: carbón activado, zeolitas, tamices moleculares de zeolitas y tamices moleculares de carbón; el sistema opera a temperaturas cercanas a la ambiental. El material adsorbente bajo condiciones de altas presiones adsorbe el CO₂ del biogás. El proceso luego cambia las condiciones y la presión baja para desorber el CO₂ del material adsorbente y ser liberado.

Tecnología de diafragma

Los gases tales como el CH₄ y CO₂ y las impurezas del biogás pueden separarse en función de sus distintas permeabilidades de diafragmas. Existen diafragmas porosos, en los cuales las diferencias de

presión son las responsables del paso de los gases y diafragmas difusionales a través de los cuales los gases deben difundir.

Para la depuración del biogás, los diafragmas difusionales tienen una buena aceptación. Los componentes del biogás pasan a través de un diafragma en función de su estructura molecular (Ej. el sulfuro de hidrógeno 60 veces más rápido que el metano y el dióxido de carbono 20 veces más rápido que el metano). Es importante considerar que siempre una parte significativa de metano pasa por el diafragma y se pierde junto con las impurezas. El material del cual está compuesto el diafragma es el que determina la selectividad. Se pueden separar selectivamente CO_2 , SO_2 y H_2S en una o dos etapas.

Los compuestos separados del biogás son absorbidos en una solución, por lo que el proceso se denomina tecnología de diafragma húmedo. Para estos fines, se utiliza una solución de sosa cáustica como solvente para H_2S y soluciones de amina para CO_2 . Este procedimiento opera a bajas presiones.

Mineralización y biomineralización

En estos procesos, el CO_2 se separa mediante reacciones químicas con CaO para formar carbonato de calcio (CaCO_3), el cual puede utilizarse como material de construcción. Sin embargo, hay que tener presente que la cal viva (CaO) se elabora “calcinando” la cal, un proceso que libera una molécula de CO_2 por cada molécula de CaO producida, lo cual genera un impacto ambiental. Para realizar una evaluación precisa del impacto ambiental de dicha tecnología se precisa entonces emplear las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Purificación criogénica del biogás

La condensación criogénica consiste en un proceso de purificación del biogás a bajas temperaturas que se basa en la diferencia entre los puntos de ebullición de los gases a separar, eliminando el CO_2 a alta presión desde la fase líquida. Son varias etapas sucesivas de enfriamiento y compresión, después de las cuales se eliminan los distintos componentes no deseados para finalmente operar la columna a condiciones cercanas a $-78,5^\circ\text{C}$ (punto de sublimación del CO_2) y 26 bar (Figura 2). Con este proceso se puede llegar a un 90-98% de CH_4 , además de que permite separar el CO_2 del CH_4 , ambos con alta pureza. Una de sus ventajas más importantes es, después de aplicado este proceso, el bajo coste de energía extra para la obtención de biometano líquido [18]. A pesar de dichas ventajas, esta tecnología es de las menos aplicadas debido a sus altos costes de inversión y operación.

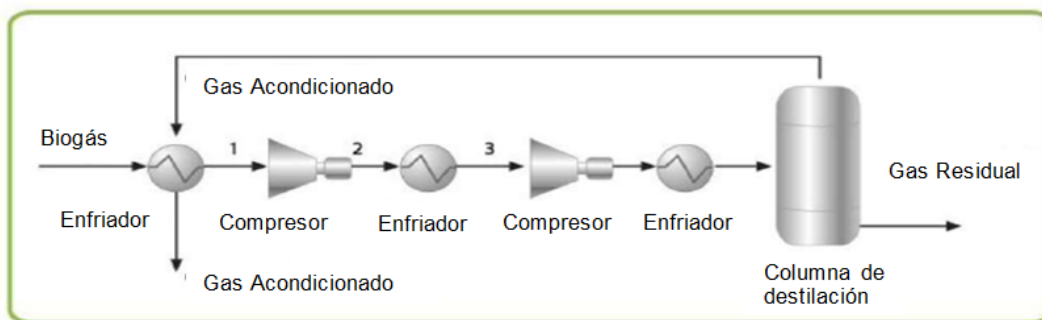


Fig.2 Esquema del proceso de criogenización del biogás [18]

Remoción de agua

Al momento de salir del digestor, generalmente, el biogás se satura con vapor. El biogás debe tener una humedad relativa inferior a 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte. Este condensado, particularmente en combinación con otras impurezas puede corroer las paredes de las tuberías. Frecuentemente, el biogás debe ser secado antes de ser purificado.

El biogás puede secarse por compresión y/o enfriamiento del gas, adsorción en carbón activado o sílica gel o absorción, principalmente en soluciones de glicol y sales higroscópicas.

Remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S)

El sulfuro de hidrógeno en combinación con el vapor de agua en el biogás crudo, puede formar ácido sulfúrico (H₂SO₄) el cual es muy corrosivo para los motores y sus componentes.

A concentraciones sobre 100 ppm en volumen, el H₂S es también muy tóxico. El carbón activado puede utilizarse para remover el H₂S y CO₂. El carbón activado actúa como catalizador convirtiendo el H₂S en azufre elemental (S). Otra forma de lavar el sulfuro de hidrógeno es usando soluciones de NaOH, agua o sales de hierro.

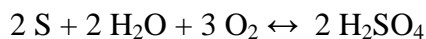
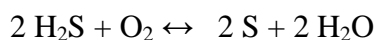
Un proceso simple y barato consiste en dosificar una corriente de biogás con O₂, el cual oxida el H₂S a azufre elemental. La dosificación con oxígeno puede reducir el contenido en el biogás de H₂S a niveles bajo 50 ppm. Esta dosificación con oxígeno, no está exenta de riesgos de explosión, por lo cual debe efectuarse con precaución.

El óxido de hierro también remueve el H₂S transformándolo en sulfuro de hierro. Este método puede ser sensible en presencia de un alto contenido de vapor de agua en el biogás [19].

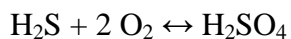
Desulfuración biológica

El uso de microorganismos en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de H₂S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental o sulfatos (SO₄²⁻). El sulfuro de hidrógeno es absorbido en agua y es oxidado biológicamente. La oxidación quimiolitotrofa del H₂S puede ocurrir en presencia o ausencia de oxígeno. En condiciones micro aerobias el compuesto de azufre reducido actúa como donador de electrones y el oxígeno como aceptor de electrones y, en condiciones anaerobias, el ion nitrato actúa como aceptor de electrones. Los principales microorganismos estudiados corresponden a los géneros *Beggiatoa*, *Xanthomonas* y, especialmente, *Chlorobium*, *Thiobacillus* y *Sulfolobus*.

La descomposición del H₂S para formar sulfato y/o azufre ocurre según:



La reacción directa de H₂S a sulfato también es posible:

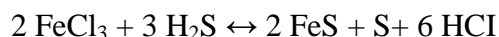
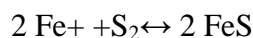


Para que ocurran estas reacciones, los microorganismos requieren carbono y sales inorgánicas (N, P, K) como nutrientes al igual que elementos traza (Fe, Co, Ni). Estos nutrientes deben estar presentes en el sustrato en cantidades adecuadas.

En el caso de los microorganismos aeróbicos que atacan el H_2S , es necesaria la adición de aire a una tasa de 4-6% del biogás para que se desarrollen. Debido al riesgo de explosión, la dosificación del aire debe ser limitada, proporcionando una concentración máxima de aire de 12% en volumen del biogás. Los microorganismos requieren además, una superficie (la cual es humedecida) para la inmovilización. Se requiere aproximadamente 1 m^2 de superficie para la desulfuración de 20 m^3 de biogás.

Precipitación de sulfuros

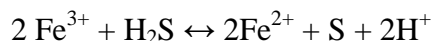
Los iones Fe^{2+} en la forma de cloruro de hierro (II) (FeCl_2) o los iones Fe^{3+} en las formas de cloruro de hierro (III) o sulfato de hierro (III) permiten la precipitación de azufre a una forma estable que permanece en el residuo.



Para la precipitación de sulfuros, sólo se requiere un tanque de mezclado adicional y una bomba de dosificación.

Absorción en una solución férrica quelante

En soluciones férricas quelantes, los iones Fe^{3+} se reducen a iones Fe^{2+} , proceso en el cual, el sulfuro de hidrógeno se oxida a azufre elemental.

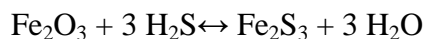
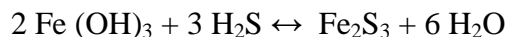


El equipo para este propósito consta de un recipiente que contiene la solución de los agentes quelantes con hierro (III) a una concentración de entre 0,01 y 0,05% en peso, en el cual se inyectan el biogás y el aire. Si el biogás que se quiere purificar de sulfuro de azufre; además, contiene como contaminante bajos niveles de oxígeno (del orden de 100 ppm), sólo se requiere un contenedor para la regeneración de los iones Fe^{3+} . En el caso, que el biogás que se quiere purificar, está libre de oxígeno, se requiere un segundo contenedor a través del cual circule la solución. En el primer contenedor, el biogás es desulfurado. En el segundo contenedor, la solución de iones Fe^{3+} es regenerada mediante el aire inyectado.

El azufre elemental se concentra en el fondo del contenedor, por lo que debe ser removido con cierta frecuencia.

Adsorción en compuestos de hierro

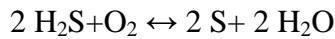
En este procedimiento, el sulfuro de hidrógeno es adsorbido en hidróxido de hierro (III) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) y/o óxido de hierro (III) (Fe_2O_3). Estos procesos corresponden a una desulfuración seca.



Las masas de óxido o hidróxido de hierro quedan aglomeradas capa por capa en una torre desulfuradora, impregnados en lana de acero, chips de madera o pellets de madera.

Adsorción en carbón activado

En el caso de generación de biogás libre de oxígeno y que presente concentraciones medias a altas de H₂S, el sulfuro de hidrógeno molecular se adsorbe en la superficie de carbón activado. Sin embargo, generalmente la eficiencia de la descontaminación no es suficiente. Por esto, el carbón activado se impregna con catalizadores, para de esta forma incrementar la velocidad de reacción de oxidación del H₂S a azufre elemental. Existen diversos agentes catalizadores; por ejemplo, el carbón activado se puede impregnar con yoduro de potasio (KI) a una concentración de 1-5% en peso solamente en presencia de oxígeno y agua. El H₂S se disuelve en la capa de agua sobre el carbón activado y no reacciona con el oxígeno a bajas temperaturas (50-70 °C) y una presión de operación de 7-8 bar.

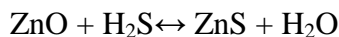


El catalizador yoduro de potasio (KI) además previene la formación de ácido sulfúrico debido a que el potencial de oxidación para esta reacción es muy bajo.

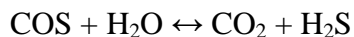
Otros agentes catalizadores que se utilizan para impregnar el carbón activado son el carbonato de potasio (K₂CO₃) y permanganato de potasio (KMnO₄).

Enlace químico con zinc

En plantas agrícolas pequeñas, es posible producir un biogás con bajas concentraciones de sulfuro de hidrógeno, haciendo pasar el biogás a través de un cartucho de óxido de zinc (ZnO)



El azufre permanece enlazado químicamente dentro del cartucho, el cual debe ser reemplazado al cabo de un tiempo. Incluso, otras sustancias como sulfuro de carbonilo (COS) y mercaptanos pueden removerse con óxido de zinc, cuando ambos han sido previamente hidrolizados a H₂S.



Remoción de oxígeno

Un contenido alto de oxígeno en el biogás podría ocurrir solamente en casos excepcionales. Este oxígeno se puede eliminar con los procedimientos de desulfuración.

Los procesos de adsorción, por ejemplo, con carbón activado, tamices moleculares, o la tecnología de diafragma también son aplicables.

3. Aprovechamiento del biogás en motores diesel

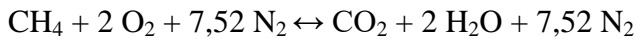
El metano, principal componente del biogás (CH₄, CO₂ y H₂S), producido de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, como cualquier hidrocarburo gaseoso, se puede utilizar eficientemente como combustible en motores de combustión interna.

En motores de encendido provocado (MEP) el proceso de combustión inicia hacia el final de la carrera de compresión, después de que se produce una descarga eléctrica a través de una bujía. Esta descarga inflama la mezcla aire-combustible que se encuentra entre los electrodos de la bujía y posteriormente se produce la propagación del frente de llama a través de la mezcla restante, el cual se extingue al llegar a las paredes de la cámara de combustión. Por otra parte, los motores de encendido por compresión

(MEC) los cuales funcionan basados en el ciclo diésel, solo admiten aire al inicio de la etapa de admisión mientras que el combustible se empieza a inyectar en la etapa de compresión, etapa en la cual se realiza la mezcla a altas presiones y temperaturas para causar la autoinflamación del combustible. En ambos casos los gases producto de la combustión se expanden en el cilindro realizando trabajo mecánico para ser expulsados a menor temperatura en la carrera de escape.

Los MEC tienen mayor eficiencia de combustión respecto a los MEP, trabajan con relaciones de compresión más altas, además de no utilizar válvula para el control de la cantidad de aire a la entrada de la cámara. Por esto, los MEC son más adecuados técnica y económicamente para gran cantidad de aplicaciones, entre estas la generación de energía eléctrica mediante motores estacionarios [20].

Un biogás con un contenido de metano entre 55 y 65%, al entrar en combustión, produce una llama azul y puede tener un poder calorífico entre 18.000 a 24.000 KJ/m³. Para tener idea del comportamiento termodinámico del biogás en el proceso de combustión, es conveniente, como punto de referencia, conocer el comportamiento del metano o gas natural como combustible. La estequiometría de la combustión del metano se plantea en la siguiente reacción:



De esta forma, la relación en masa de aire/combustible será:

$$(2 \text{O}_2 + 7,52 \text{N}_2)/(\text{CH}_4) = (64 + 210,5)/16,04 = 17,1 \text{ Kg de aire por cada kilogramo de metano quemado}$$

Si se tiene en cuenta que la relación de compresión del metano o gas natural está del orden de 8/1, siendo similar a la de otros combustibles gaseosos y gasolinas y además el óptimo índice de octanos (similar al de una gasolina etílica), su relación aire/combustible (la relación de compresión para la gasolina es de 7,5/1), la posibilidad de compresión por encima de la establecida para motores de combustión del ciclo Otto (130 psi) permite predecir un buen comportamiento del biogás y, específicamente, el metano como combustible en motores de combustión especialmente para aquellos que trabajan con gas y gasolina, aunque es factible, por la alta compresibilidad, poder utilizarse en motores de combustión tipo diésel.

Los motores diésel a biogás se usan para cubrir la carga base donde no hay una estación de alimentación, como reserva o para disminuir los costos en una instalación durante los periodos pico. Requieren algunas modificaciones para permitirles que funcionen principalmente con biogás complementado con combustible diésel; esto es una operación de combustible dual con hasta el 60% del requerimiento de combustible diésel reemplazado por biogás.

El aire se comprime hasta alcanzar una temperatura mayor a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión ocurre al contacto cuando éste es inyectado (bujía y carburador sustituidos por inyector de combustible). Como solo se comprime el aire se evitan problemas de autoencendido. Las relaciones de compresión para este motor van de 12 a 24.

La mayoría de los motores diésel pueden ser modificados para su operación con combustible dual. Para la realización de esta modificación es necesario adicionar un mezclador al múltiple de admisión del motor para garantizar la mezcla aire-gas (similar a un motor de carburación) y un tope para la cremallera de la bomba de inyección (Figura 3) [11, 22]. En muchos casos, el arreglo más sencillo es el de conectar la tubería del suministro de biogás directamente al tubo de admisión de aire de motor, después del filtro (Figura 4) [23].

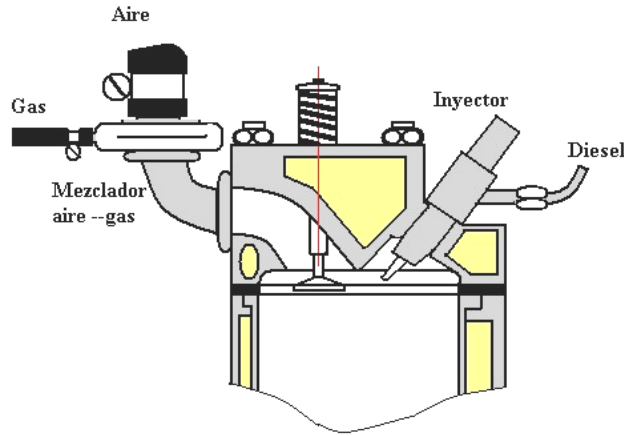


Fig.3 Adaptación del motor diesel para trabajar de forma dual con combustible gaseoso [24]

Experiencias con motores tipo diesel en China, India y Nepal señalan la necesidad de utilizar mezclas de un 20% de combustible diesel con un 80% de biogás para producir una eficiente combustión. Para garantizar que la cantidad de biogás que entre en la admisión de aire sea la deseada se emplean distintos sistemas mezcladores que dosifican las proporciones y garantizan la presión máxima a la entrada de 8 bar y la de salida a las cámaras del motor de 2-3 bar. Estos sistemas pueden ser automatizados o más simples como un Venturi [25]. Al aumentar el nivel de sustitución de biogás a más de 60%, se tiene una reducción de la eficiencia promedio respecto al modo diesel de entre 3 y 10%. Para asegurar una operación satisfactoria con combustible dual, el H₂S del biogás debe ser removido.

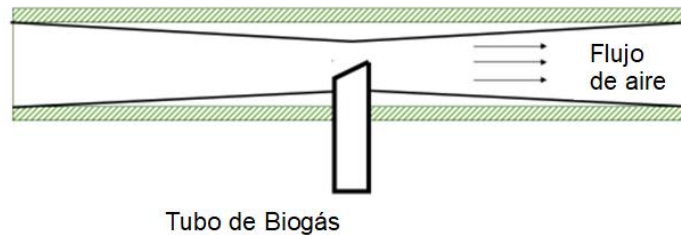


Fig.4 Venturi hecho con láminas de hierro galvanizado [25]

Tabla 3. Características generales del motor diesel [26]

Motor Diesel		
Combustible		Biogás 60% Diesel 40%
Tamaño		5 kW-5 MW
Eficiencia (%)		28-32
Emisiones (g/kWh)	CO ₂	590-800
	NO _x	4,5-18,6
	SO ₂	0,18-1,36
	CO	0,18-4
Disponibilidad (%)		90-95
Superficie (m ² /kW)		0,003-0,03

Conclusiones

El empleo de biogás en motores de combustión interna debe necesariamente pasar por una definición de la calidad mínima requerida del biocombustible (cualitativa y cuantitativamente) debido a que de esta composición dependerá no solo las prestaciones en el motor y por ende la eficiencia en el uso de la energía, sino también el impacto que genera el contenido de determinados compuestos químicos que trae el biogás en partes del motor. Por ello, el empleo de biogás para producción de energía en MCI debe ir acompañado de normas para calidad del biocombustible, forma de uso en el motor y parámetros operacionales. Se debe definir claramente el nivel de pureza y componentes del biocombustible y las tecnologías a instalar y emplear ya que la calidad del producto está directamente relacionada con el costo asociado a su producción.

Referencias

1. Organization of the United Nations, *Status of Ratifications*. New Zealand 14. 2009.
2. Suárez, J., Martín, G., *La biomasa como fuente renovable de energía en el medio rural*, 2012. Matanzas, Cuba: Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey. ISBN 978-959-7138-14-3.
3. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. La Habana: IDICT. ISBN 978-959-234-095-4.
4. Benato, A., Macor, A., Rossetti, A., *Biogas Engine Emissions: Standards and On-Site Measurements*. Energy Procedia, 2017. **126**(201709): p. 398-405.
5. Mustafi, N.N., Raine, R.R., Bansal, P.K., The use of Biogas in Internal Combustion Engines: A Review. Proceedings of the ICES2006, 2006.
6. Rahman, K.A., Ramesh, A., *Effect of reducing the methane concentration on the combustion and performance of a biogas diesel predominantly premixed charge compression ignition engine*. Fuel, 2017. **206**: p. 117-132.
7. Cepero, L., *Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores*. Pastos y Forrajes, 2012. **35**(2): p. 219-226.
8. FAO. *Manual de Biogás. Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*, 2011. Proyecto CHI/00/G32, Chile.
9. Piloto-Rodríguez, R., Sierens, R., Verhelst, S., *Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engines and predictive correlations for the ignition delay*. Fuel, 2011. **90**(2): p. 766-772.
10. Colectivo de Autores. *Biodiesel. Producción y Uso*, 2021. Editorial Pastos y Forrajes. ISBN: 978-959-7138-48-8.
11. Castillo, A., *Análisis del rendimiento de un motor de combustión interna con biogás*, 2014. Universidad de Latacunga, Ecuador.
12. Björkhem, K.H., *Beneficios de la solución de filtración de aire molecular adecuada para la industria de producción de biogás*, 2020. Alemania.
13. Mendoza, J., *Estudio experimental de un motor bi-combustible para el uso de biogás*, 2015. Tesis profesional. Pontificia Universidad Católica del Perú.
14. Ponce, J., *Influencia del biogás en motores de combustión interna Diésel*, 2019. Lima, Perú.
15. Hasam, K., Mustafa, Y., Zafer, G., *Compressed Biogas-Diesel Dual-Fuel Engine Optimization Study for Ultralow Emission*. Advances in Mechanical Engineering, 2014. Istanbul, Turquía.
16. Mogena D., *Evaluación de la producción de biogás en Cuba por medio de los biodigestores en entidades del grupo empresarial ganadero*. Revista de Producción Porcina, 2019.

17. Atlas de Bioenergía de Cuba. Sector agropecuario y forestal. Editorial Cubaenergía, 2018. ISBN 978-959-7231-07-3.
18. Hidalgo, D., *Producción de Biometano*, 2019. Pando, Uruguay.
19. Muche, H., *La purificación del biogás*, 1985: Lengerich, Alemania.
20. Jaramillo, J.S., *Estudio de las inestabilidades de combustión de un motor de encendido provocado trabajando con altas relaciones de compresión*, 2017. Universidad de Antioquia, Colombia.
21. Nick, C., *Motor diesel*, 2020. Suecia.
22. Ambarita, H., *Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel mode*, Case Studies in Thermal Engineering, 2017. Medan, Indonesia.
23. Bermejo, F., Orozco, W., *Diseño de un mezclador aire-biogás para un motor Diesel turboalimentado*, 2020. Universidad Autónoma del Caribe, vol. VIII.
24. Edel, C.L., *Utilización del biogás como combustible en motores de combustión interna diesel*, 2007. Santa Clara, Cuba.
25. Castillejo, A., *Sistemas de inyección en motores Diesel*, 2014. Universidad de Sevilla, España.
26. Veramendi, R.C., *Estudio del comportamiento de un motor diesel con suministro de biogás*, 2004. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.