

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA FÍSICO DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

AUTORES:

Recibido: agosto 25, 2017
Aceptado: septiembre 23, 2017

C. Mójica Mesinas¹
E. Vidal Becerra²
A. Zavala Ballesteros³
D. Torres Lara⁴

RESUMEN

En este trabajo se diseñó y construyó un sistema físico para purificación de biogás, en su mayor parte a base de PVC y CPVC; motivado por la necesidad de mejorar la calidad del biogás producido en un biodigestor tipo salchicha, a partir de estiércol de cerdo y de bovino. El sistema consistió en una torre de lavado con agua presurizada a contracorriente, con un caudal de 20 l/min para provocar el proceso de adsorción del CO_2 y la dilución del H_2S en el agua. El gas ya lavado, se dirige hacia la torre de secado, empaquetada con aserrín y carbón activado en una relación 3:1, que proporciona área de contacto necesaria para absorber la humedad del gas. El biogás sale de la torre de secado y se almacena en un reservorio de geomembrana para su empleo posterior, que puede ser en la generación de calor o en motores de combustión interna usados en el sector agropecuario. Se construyó una tercera torre de desorción a fin de optimizar el consumo de agua en el proceso de purificación del biogás y eliminar el CO_2 y H_2S remanentes. Se logró purificar 0.650 m³/h, que es la capacidad para un compresor de ½ Hp. El sistema de purificación permitió obtener una concentración máxima de metano del 93.15 %, cuando se purificó con la temperatura y presión menor (27 °C y 54.5 Kpa, respectivamente) y una mínima del 89.45 % cuando se purificó con la mayor temperatura y presión (37 °C y 72 Kpa, respectivamente).

PALABRAS CLAVE

Sistema de Purificación, biogás, diseño, agua a presión.

ABSTRACT

In this work, a physical system for biogas purification was designed and built, mostly based on PVC and CPVC; motivated by the need to improve the biogas quality produced in a sausage type biodigester, from pig and bovine manure. The system consisted of a washing tower with pressurized water against the flowing, with a flow rate of 20 l / min. to cause the CO_2 adsorption process and the H_2S dilution in the water. The already washed gas is directed towards the drying tower, packed with granulated lime and activated charcoal in a 3: 1 ratio, which provides the required contact area to absorb the moisture of the gas. The biogas leaves the drying tower and is stored in a geomembrane reservoir for later use, which may be in the generation of heat or in internal combustion engines used in the agricultural sector. A third desorption tower was built in order to optimize the water consumption in the biogas purification process and to remove the remaining CO_2 and H_2S . It made purify 0.650 m³ / h, which is the capacity for a ½ HP compressor. The purification system allowed to obtain a maximum methane concentration of 93.15%, when it was purified with the lowest temperature and pressure (27 ° C and 54.5 Kpa, respectively) and a minimum of 89.45% when was purified with the highest temperature and pressure (37 ° C and 72 Kpa, respectively).

¹ Profesor del programa de Ingeniería Ambiental. cuitlahuac.mojica@tecvalles.mx

² Profesora del programa de Ingeniería Industrial. elia.vidal@tecvalles.mx

³ Estudiante tesista de Ingeniería Industrial. alberballes33@gmail.com

⁴ Estudiante tesista de Ingeniería Industrial. dianatl317@gmail.com

KEY WORDS

Purification system, biogas, design, pressurized water.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el tema de la generación de energía ha sido muy recurrente en cuanto a las nuevas alternativas, pues los métodos tradicionales tienden a ser dañinos para el ambiente. Desde la propia energía física, la de los animales, la del agua y el viento, la generada a partir de la explotación de combustibles fósiles, hasta las energías renovables, cualesquiera que sean, la disponibilidad de energía siempre ha sido esencial para la humanidad.

Según la revista *Energías Renovables*, las fuentes de energía renovable que hasta ahora existen son: la eólica, la solar térmica y fotovoltaica, la biomasa y los biocarburantes, la hidráulica, la geotérmica y las energías procedentes del mar (Merino, 2012).

En la problemática del cambio climático que se vive actualmente, el uso de la bioenergía tiene importantes ventajas frente a los combustibles fósiles, que al sustituirlos reduce grandes cantidades de emisiones que contribuyen a esta problemática. (Estrada Gasca & Jorge, 2010).

Para este proyecto, se diseñó y construyó un sistema físico para purificar el biogás producido a partir de biomasa, específicamente estiércol de cerdo y bovino. Se partió de la necesidad de aumentar la pureza del biogás, ya que en su proceso anaeróbico de producción se generan, además del metano, otros compuestos que afectan su calidad. El biogás, es un gas producto de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por acción directa de microorganismos metanogénicos. Está compuesto básicamente de gas metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2), entre otros. (FIRCO, 2013)

Específicamente, el sistema de purificación objeto de este proyecto, es para mejorar el poder calorífico del biogás al reducir el CO_2 , así como para evitar la corrosión de los metales por donde éste fluya, por la reducción del H_2S .

(Viquez Arias, 2010), en su artículo “Remoción del ácido sulfhídrico (H_2S) en el biogás”, refiere que existen dos tipos de purificación; el de remoción “húmeda” y el de “sustrato seco”. Especifica que para un biodigestor en el sector agropecuario (como es el caso), los métodos líquidos para remover H_2S tienen costos muy elevados, de ahí que los métodos secos sean una mejor opción.

Por otro lado, para el caso del CO_2 , se usó agua a contracorriente que es un sustrato líquido, pero al ser solo agua, no es costoso. El CO_2 atrapado en agua, posteriormente puede ser liberado a la atmósfera al disminuir la presión y pasar una corriente de aire por el líquido. (Leitón, 2015)

METODOLOGÍA

Diseño

Como se ilustra en la imagen 1, se partió de un diseño realizado en AutoCAD, en donde las líneas azules ilustran la conducción del agua y las amarillas la del gas.

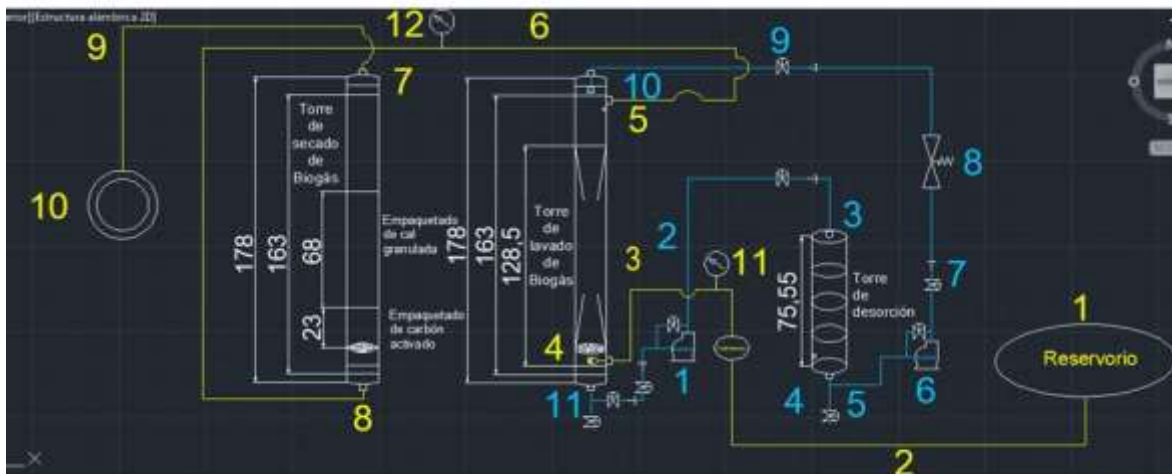


Imagen 1. Diseño en AutoCAD del Sistema Físico de Purificación de Biogás

Tabla 1. Componentes del sistema de purificación. Fuente propia.

Manejo de gas (color amarillo)	Manejo de agua (color azul)
1- Reservorio del biogás	1- Bomba de succión de agua para el lavado del biogás
2- Tubería de biogás desde el reservorio hacia el compresor	2- Tubería de agua hacia la torre de lavado de biogás
3- Tubería de biogás hacia la torre de lavado	3- Entrada de agua hacia la torre de desorción
4- Entrada del biogás al proceso de lavado	4- Salida de agua de la torre de desorción
5- Salida del biogás del proceso de lavado	5- Tubería de la torre de desorción hacia la segunda bomba de succión
6- Tubería hacia la torre de secado de biogás	6- Bomba de succión desde la torre de desorción hacia el radiador
7- Entrada del biogás a la torre de secado	7- Tubería de agua desde la torre de
8- Salida del biogás de la torre de secado	

Manejo de gas (color amarillo)	Manejo de agua (color azul)
9- Tubería de biogás hacia el receptor del gas 10- Receptor final del biogás 11- Manómetro de alta presión 12- Manómetro de baja presión	desorción hacia el radiador 8- Radiador encargado de enfriar el agua que va hacia la torre de lavado 9- Tubería de agua desde el radiador hacia la torre de lavado 10- Entrada de agua hacia la torre de lavado 11- Salida de agua de la torre de lavado. En esta salida, el agua repite el circuito de lavado.

Materiales

Los materiales usados fueron seleccionados considerando sus características y sus costos. Se investigó la manera de hacerlo funcional con materiales de bajo costo y accesibles tomando en cuenta la vida útil.

La base que soporta las tres torres es una tarima de madera. Se usó madera reusada y reforzada con partes de dos tarimas con la facilidad de ser reemplazada cuando sufra algún daño. Se pueden usar una y otra vez sin que se pierda resistencia o capacidad de carga.

Las tuberías de las torres son de PVC y las de distribución de gas y agua son de CPVC. Estos materiales son económicos, facilitan el ahorro de energía gracias a su bajo peso y su alto poder aislante, son de fácil instalación, presentan resistencia mecánica, flexibilidad, inalterabilidad en el tiempo, resistencia a agentes químicos (ácidos, bases, sales y óxidos) y reciclabilidad.

Las bombas utilizadas y la malla que se encuentra dentro de la torre de lavado están fabricadas con acero inoxidable cuya vida útil es alta. Además, el acero puede ser 100% reciclado sin perder sus propiedades.

Tabla 2. Materiales utilizados en el prototipo y sus costos. El sistema puede realizarse en su mayoría con material de reúso. Fuente propia.

Material	Costo	Material	Costo
YEE PVC sanitario 4'	\$22.70	18 Tubo CPVC de 1/2"	\$1,413.00
		4 Tubos PVC de 6 "	\$381.52

Material	Costo	Material	Costo
2 Costales con piedras de río	N.A.	3 Tapas inserción de PVC	\$23.31
1 Fluxómetro FL-3096 SA	\$9,445.00	1 Compresor para refrigeración de 1/2 Hp, 110v.	\$2,677.10
1 Caja de 100 pijas de 1" de largo del no. 6	\$20.00	1 Bolsa de geomembrana de 250 l. Salida a tubo PVC de 3/4"	\$495.00
2 Bombas Compactas De 1 Hp Para Agua de 3600 Rpm.	\$1,725.00	1 Rollo de cable eléctrico de cobre THW Calibre 10 y 12	\$392.00
12 O-ring de 1/2"	\$153.00	4 Pilas recargables para los equipos digitales y su cargador.	\$199.00
2 Tarimas de madera	\$60.00	1 Lata de pegamento PVC Presto	\$232.17
4 Cubetas de plástico de 19 l	N.A.	4 Mangueras industrial transparente 1 1/2'	\$169.64
2 Rollos de cinta aislante	\$130.00	2 Mallas de acero inoxidable	\$600.00
3 Bases de acero	\$400.00	12 TEE azul 1/2'	\$38.30
20 Codos azul de 1/2' x 90°	\$44.00	10 Red bushing azul 3/4' x 1/2'	\$17.60
6 Adaptadores hembra azul de 1/2'	\$48.18	12 Válvula bola de 1/2'	\$798.96
8 Adaptadores macho azul de 1/2'	\$17.68	4 Couples sanitario 6'	\$59.32
1 Manómetro húmedo con diámetro de caratula de 2 1/2'	\$1,355.00	1 Manómetro seco con diámetro de caratula de 2 1/2'	\$1,570.00

N.A.: No aplica, debido a que en el caso de las piedras de río no se compraron y las cubetas son material de reúso.

Dimensiones y Cortes

Se realizaron los cálculos de las dimensiones del sistema. Para la columna de lavado, se tiene lo siguiente:

Área de la sección transversal al flujo:

$$A = Q / V$$

Donde,

A: Área de la sección transversal perpendicular al flujo de gas (m²).

Q: Caudal de gas (m³/h).

V: Velocidad de diseño del gas (m/s).

En este caso:

Diámetro = 6 " = $6 \times 2.54 \times 10^{-2} \text{ m} = 0.1524 \text{ m}$

$R = D/2$

$R = (0.1524 \text{ m}) / 2 = 0.0762 \text{ m}$

Área = $(0.0762 \text{ m})^2 \times \pi = \mathbf{0.00580644 \text{ m}^2}$

$Q = 0.650 \text{ m}^3 / \text{h}$

$V = Q / A = (0.650 \text{ m}^3 / \text{h}) / (0.00580644 \text{ m}^2) = 111.9446 \text{ m/h}$

Transformando a m/s:

$V = 111.9446 \text{ m/hr. } (1 \text{ h.} / 3600 \text{ s}) = \mathbf{0.03109 \text{ m} / \text{s}}$

Está dentro de lo recomendado por la bibliografía, que indica, debe ser menor a 1 m/s.

Las velocidades de diseño recomendadas, debe ser menor de 1 m/s, para aumentar el tiempo de contacto entre la fase líquida y gaseosa.

Respecto de estos antecedentes, la altura promedio de la columna de aspersión se calcula mediante la siguiente relación:

$6 = L/Dr$

Donde,

L: altura

Dr: diámetro

Se tiene como antecedente que la proporción entre la longitud y el diámetro varía entre 3 y 6, para un equipo de contacto gas – líquido.

En este caso:

$Dr = 0.1524 \text{ m}$

$L/Dr = 6$

Entonces:

$L = 6 \times Dr = (6 \times 0.1524 \text{ m}) = \mathbf{0.9144 \text{ m}}$ (altura del empaquetado)

Y si se considera la relación de:

$Dr = 0.1524 \text{ m}$

$L/Dr = 3$

$L = 3 \times Dr = (3 \times 0.1524 \text{ m}) = \mathbf{0.4632 \text{ m}}$ (altura del empaquetado)

Como la columna tiene una altura de 1.35 m, se está dentro de la proporción que marca la bibliografía, que es entre 3 y 6. (Geankoplis, 2006)

Con estos datos se cortó un tubo de PVC de 6" de ancho y 168 cm de longitud ya que de acuerdo a la medida del empaquetado de la columna, se debe dar a un espacio libre para la cámara de gas y la alimentación del agua y el gas. Como se ilustra en la imagen 2, se usaron aspersores pequeños para la salida de gas y agua dentro de la torre de lavado, así mismo se les realizaron pruebas de esparido, comprobando el buen funcionamiento de éstos.



Imagen 2. Pruebas de esreado realizadas para verificar el flujo de salida de agua.

Se conectaron los coples dentro de los tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ “para posteriormente conectarlos a los aspersores. Para asegurar que no existieran fugas de gas o agua en las conexiones de los aspersores, se realizaron pruebas hidrostáticas (ver imagen 3).



Imagen 3. Pruebas hidrostáticas

Se elaboró una base para la torre de lavado, una para la torre de secado y una más para la torre de desorción, las tres fabricadas con metal. Posteriormente se construyó una base de madera para colocar en ella el sistema con todos sus componentes.

Construcción

Torre de lavado

Se elaboró una malla de acero dentro de la torre, como se muestra en la imagen 4, para sostener las piedras que se encuentran dentro.



Imagen 4. Malla de acero inoxidable, donde van las piedras.

Las piedras se lavaron, se les realizaron pruebas de durabilidad y adsorción con ácido sulfhídrico al 10% durante un mes sin deterioro alguno. Se fabricó una mirilla para controlar el nivel del agua dentro de la torre y posteriormente se colocaron las piedras dentro a un 75% de su capacidad. El propósito de las piedras fue darle superficie de contacto al agua.

El biogás es bombeado del reservorio hacia la torre de lavado por la parte inferior, con el apoyo de un compresor de refrigeración con capacidad de $\frac{1}{2}$ Hp; de esta manera interactúa con el agua por burbujeo a contracorriente para provocar el proceso de adsorción del CO_2 y la dilución del H_2S en el agua. El gas sale de la torre por la parte superior para dirigirlo hacia la torre de secado.

Torre de desorción

Esta fase está constituida por la torre de desorción, que se construyó con cuatro cubetas de 19 l. Tiene una mirilla para medir el nivel del agua, así como perforaciones en su interior y laterales que permiten la desorción a través del efecto cascada que forma el agua al pasar a través de las perforaciones, en donde al chocar el agua que contiene el CO_2 atrapado en la torre de lavado, se libera debido a la inestabilidad del sistema agua-gas adsorbido. La parte inferior de la torre contiene limaduras de hierro que provocan una reacción química en donde el H_2S precipita como sulfuro de hierro. La finalidad de esta torre es optimizar el consumo de agua en el proceso de purificación del biogás y eliminar el CO_2 y H_2S remanentes. El agua entra en esta torre por la parte superior y sale por la parte inferior.

Torre de secado

Una vez lavado el biogás pasa a la torre de secado, construida de igual forma, con PVC. Las dimensiones tienen una relación de empaquetado de longitud/diámetro de 6 “, lo que equivale a una altura de 91.44 cm. y 15.24 cm. de diámetro, con un espacio de cámara libre del 15 cm. en ambos lados. Esta torre contiene aserrín y carbón activado en una relación 3:1, para proporcionar suficiente área de contacto que permita absorber la humedad. Este método permitirá eliminar la humedad que queda en el biogás cuando sale de la torre de lavado. El biogás que sale de la torre de secado, se almacena en un reservorio de geomembrana para su uso posterior, que puede ser para generar calor (estufas, calentadores, lámparas de gas) o para motores de combustión interna.

Durante la construcción del sistema de purificación, se realizaron pruebas de hermeticidad para evitar fugas del gas, mismas que se llevaron a cabo en el Laboratorio de Alimentos y Ambiental del Instituto Tecnológico ubicado en Ciudad Valles S.L.P. Estas pruebas, como se ve en la imagen 5, consistieron en colocar agua jabonosa, en cada una de las uniones del sistema, mientras se le inyectaba aire con la bomba a una presión de 0.6 kg/cm^2 , con el fin de descartar la presencia de fugas a través de algún burbujeo.



Imagen 5. Pruebas de hermeticidad

De esta manera, el sistema quedo conformado por una torre de lavado, una torre de secado, una torre de desorción, un radiador para disminuir la temperatura del agua dentro del sistema, dos bombas de 1Hp y un compresor de 1/2 Hp (Ver imagen 6).



Imagen 6. Sistema físico de purificación de biogás

El biogás a purificar se obtuvo del Proyecto de Tesis denominado “*Diseño, Construcción y Prueba Piloto de un Biodigestor Anaeróbico en una Granja Porcícola de Ciudad Valles S.L.P*” elaborado por pasantes de las carreras de Ingeniería Industrial e Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Ciudad Valles.

RESULTADOS

Se comprobó la funcionalidad del sistema con una prueba de resistencia que se hizo introduciendo piedras de río con un peso total de 70 kg aproximadamente en un tubo de PVC a una altura de 118.5 cm x 18 cm de diámetro. Así también se comprueba la resistencia de la tarima de madera que sirve de base para las tres torres con su soporte de metal, dos bombas, un compresor y un radiador.

Se realizaron pruebas de hermeticidad que arrojaron resultados óptimos al no presentar fugas en las conexiones del sistema.

Se realizaron pruebas eléctricas para el motor y pruebas hidrostáticas para cada uno de los aspersores comprobando así su correcto funcionamiento dentro del sistema.

El biogás que entra al sistema, tal y como sale del biodigestor, tiene la siguiente concentración: 68.57% de metano, 30.56% de Dióxido de Carbono y 0.88 % de Sulfuro de Hidrógeno.

Una vez puesto en operación el sistema, las pruebas de cromatografía arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 3. Resultados de la cromatografía de gases después de la purificación. A un flujo de agua de 1.5 m³/h y de gas de 0.65 m³/h. Fuente: Propia.

Resultados de Cromatografía de gases						
	Muestras	Contenido de gases a diferentes presiones y temperaturas con agua presurizada		Gases		
		Temp. (°C)	Presión del Agua (Kpa)	Metano	Dióxido de Carbono	Sulfuro de Hidrógeno
Al salir de la	Primera muestra	27	54.5	93.15	6.84	0.01
	Segunda muestra	33	68.4	91.15	8.84	0.01

torre de lavado						
	Tercera muestra	37	72.0	89.45	10.53	0.02
Al salir de la torre de secado	Primera muestra	23	54.5	96.457	3.534	0.009
	Segunda muestra	28	68.4	94.018	5.971	0.011
	Tercera muestra	34	72.0	91.022	8.964	0.014

Los resultados permiten ver que el sistema de purificación mejora considerablemente la calidad del biogás. Al reducir los contaminantes (Dióxido de Carbono y Sulfuro de Hidrógeno), se aumenta la concentración de metano y así mismo su poder calorífico.

El mejor resultado se obtuvo cuando la temperatura y la presión del agua fueron menores, debido a que se favorece la adsorción, como se aprecia en la tabla 3.

CONCLUSIONES

Después de la purificación con la torre de lavado se concluye lo siguiente:

- El sistema de purificación permitió obtener una concentración máxima de metano del 93.15 %, cuando se purificó con la temperatura y presión menor (27 °C y 54.5 Kpa, respectivamente) y una mínima del 89.45 % cuando se purificó con la mayor temperatura y presión (37 °C y 72 Kpa, respectivamente).

Después de la purificación con la torre de secado se concluye:

- El sistema de purificación permitió aumentar la concentración de metano entre la primera y segunda muestra un 3% (96.457% y 94.018% respectivamente) y en la tercera muestra 2% (91.022%).
- Se logró disminuir el dióxido de carbono un 3% más en la primera y segunda muestra (3.534% y 5.971% respectivamente) y en la tercera muestra un 2% (8.964%).
- Se logró purificar 0.650 m³/h de biogás, que es la capacidad para un compresor de ½ Hp.
- La factibilidad de producir biogás a partir de los residuos orgánicos de la región, por sí sola no garantiza su uso como biocombustible, y es la purificación un paso importante para propiciar con los productores agropecuarios, el uso de manera más efectiva y segura.

Recomendaciones

- Se recomienda probar algunos sustratos para la torre de secado, en virtud de que el biogás sale con humedad y esta característica demerita su calidad para uso posterior.

BIBLIOGRAFÍA

- Etcharren, P. (2005). *Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fabrica "Lubascher y Krausse" Temuco.* . Temuco, Chile.
- FIRCO. (2013). *Especificaciones Tecnicas para Biodigestores Pequeños Tipo Laguna.* Ciudad de México.
- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación.* Mexico.
- Leitón, J. (2015). Purificación de Biogás Utilizando agua a Presión. *Revista Científica Escuela Centroamericana de Ganadería (ECAG)* , 66-71.
- Merino, L. (2012). *Energías Renovables Para Todos.* Madrid, España: Energy Management Agency.
- Varnero, M.M.T., 2011. Manual de biogás. Gobierno de Chile. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Global Environment Facility, Proyecto CHI/00/G32: "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables". Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Viquez Arias, J. A. (2010). Remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S (g))/ácido sulfhídrico (H₂S /aq)) en el biogás. *ECAG Informa*, 16-21.