



Evaluación de un sistema de aprovechamiento del gas metano como combustible para calderas en una destilería

Gómez Hernández Franklin Rafael

Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Decanato de Agronomía. Programa de Ingeniería Agroindustrial.
Barquisimeto, Venezuela

<https://orcid.org/0000-0001-5306-2641> frgh29@gmail.com

ASA/Artículo

doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.7365058>

Recibido: 06-02-2022

Aceptado: 22-09-2022

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó un sistema de aprovechamiento del gas metano (SAGM) generado en el proceso de digestión anaeróbica de la vinaza. El biogás se desea utilizar como combustible en calderas de la empresa Destilerías Unidas S.A. (DUSA). Se empleó la investigación explicativa y diseño experimental. El SAGM fue diseñado a escala de laboratorio, estuvo conformado por un reactor anaeróbico para el tratamiento de la vinaza con volumen útil de 6 L, una columna de adsorción sólido-gas rellena con epicarpio de *Cocos nucifera* (concha de coco) y por una columna de absorción líquido-gas con solución de óxido de calcio (cal). La eficiencia de las columnas fue evaluada individualmente para conocer su efecto en la remoción de H_2S y CO_2 , como los principales contaminantes del biogás al ser usado como combustible de motores fijos. Inicialmente se realizó la caracterización del biogás determinando la concentración de H_2S y CO_2 por métodos volumétricos, posteriormente se evaluó la eficiencia de remoción de cada uno de los gases al pasarlo por el S.A.G.M. Se obtuvo que el biogás contenía 4,89 mg/L de H_2S y 296,03 mg/L de CO_2 . El sistema de purificación fue más efectivo para la remoción del CO_2 , lográndose eficiencias de 95,78 y 98,16% al utilizar la columna de absorción y adsorción, respectivamente. El H_2S no fue removido significativamente de acuerdo a la prueba de hipótesis con un nivel de confianza del 99%, debido al bajo contenido inicial de este gas, la menor afinidad y velocidad de reacción de los sulfuros cuando está presente el CO_2 . Se concluyó que el biogás purificado en el S.A.G.M. puede ser usado como combustible en las calderas de la empresa, porque el CO_2 remanente es despreciable y la concentración H_2S está por debajo de los límites recomendados para alimentar un motor estacionario.

Palabras clave: Biogás, caldera, digestión anaeróbica, metano, vinaza.



Evaluation of a system for the use of methane gas as fuel for boilers at the company

ABSTRACT

In the present work, a system for the utilization of methane gas (S.A.G.M) generated in the anaerobic digestion process of vinasse was evaluated. The biogas is intended to be used as fuel in boilers of the company Destilerías Unidas S.A. (DUSA). Explanatory research and experimental design were used. The S.A.G.M. was designed at laboratory scale and consisted of an anaerobic reactor for the treatment of vinasse with a useful volume of 6 L, a solid-gas adsorption column filled with *Cocos nucifera* (coconut shell) epicarp, and a liquid-gas absorption column with calcium oxide (lime) solution. The efficiency of the columns was evaluated individually to know their effect on the removal of H₂S and CO₂, as the main pollutants of biogas when used as fuel for stationary engines. Initially, the biogas was characterized by determining the concentration of H₂S and CO₂ by volumetric methods, then the removal efficiency of each of the gases was evaluated by passing it through the S.A.G.M. It was obtained that the biogas contained 4.89 mg/L of H₂S and 296.03 mg/L of CO₂. The purification system was more effective for CO₂ removal, achieving efficiencies of 95.78 and 98.16% when using the absorption and adsorption column, respectively. H₂S was not significantly removed according to the hypothesis test with a 99% confidence level, due to the low initial content of this gas, the lower affinity and reaction rate of sulfides when CO₂ is present. It was concluded that the biogas purified in the S.A.G.M. can be used as fuel in the company's boilers, because the remaining CO₂ is negligible and the H₂S concentration is below the limits recommended to feed a stationary engine.

Keywords: biogas, boiler, anaerobic digestion, methane, vinasse.

INTRODUCCIÓN

Los alimentos son cualquier sustancia ingerida por los seres vivos con fines nutricionales y psicológicos. Las bebidas alcohólicas son clasificados alimentos psicológicos debido a que se ingieren con la finalidad de sensaciones gratificantes. Son productos aptos para el consumo humano elaborados a base de alcohol etílico proveniente de la fermentación alcohólica de los mostos, destilación de la mezcla de alcohol etílico y agua con adición o no de sustancias (COVENIN 3340, 1997).

En la elaboración de cualquier producto de consumo humano, es inevitable la generación de desechos sólidos, líquidos y gaseosos lo cual es importante considerar para disminuir el impacto ambiental. En el proceso de elaboración de alcohol, la vinaza es el desecho de mayor importancia a considerar por los altos volúmenes que se generan, así como por los elevados contenidos de contaminantes que posee; y por tanto, no debe ser vertida en los cuerpos de agua antes de ser tratada.

En vista de la problemática energética a nivel mundial a partir de derivados fósiles y el crecimiento demográfico, los países y las empresas estudian otras alternativas energéticas

a partir de recursos económicos y residuos, donde se utilicen procesos limpios, es decir procesos que afecten en lo menor posible al ambiente. Uno de los recursos energéticos obtenidos en tratamientos de desechos es el metano, hidrocarburo altamente inflamable que sirve como combustible para alimentar calderas (Montalvo y Guerrero, 2003).

Los procesos productivos industriales se caracterizan por generar grandes cantidades de desechos que contaminan el aire, el agua y el suelo. Particularmente, la industria de producción de alcohol (destilerías) genera un desecho líquido característico conocido como vinaza, la cual tiene altas concentraciones de materia orgánica, expresada como Demanda Química de Oxígeno (DQO), que oscila entre 15.000 – 180.000 mg/L y pH ácido que varía entre 3.5 – 5.8, se considera un desecho contaminante de importancia por las elevadas cantidades producidas, es conocido que por cada litro de alcohol destilado se obtienen entre 10 a 15 litros de vinaza (Sánchez, 1991; Bautista y Durán, 1998; Larrahondo et al. 2000; Fernandez, 2003; Garrido et al. 2010).

De acuerdo con la Normativa Ambiental Venezolana, el Decreto N° 883 (1995) establece que los efluentes líquidos a ser

vertidos en cuerpos de agua natural deben poseer como límite máximo de Demanda Química de Oxígeno 350 mg/L y pH en un rango entre 6 – 9, características que la vinaza no cumple, por lo que es imprescindible aplicar un tratamiento para mejorar la calidad de este desecho antes de su disposición final.

Normalmente, la vinaza es tratada mediante procesos anaeróbicos debido a su alto contenido de materia orgánica (Bermúdez et al., 1988); sin embargo, este tratamiento ocasiona una nueva problemática que es la generación de contaminantes gaseosos como son el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrogeno (H₂S). Ante esta situación, de no utilizar el biogás, se pierde la energía que el metano (CH₄) posee; y los gases generados ya sean procesados o no contribuyen al problema del calentamiento global por ser compuestos que producen el efecto invernadero (Castells, 2012).

El metano (CH₄), constituyente minoritario de la atmósfera, juega un papel importante como gas de efecto invernadero. Se considera el tercer gas de efecto invernadero en importancia después del CO₂ y compuestos clorofluorocarbonados (CFCs), contribuyendo aproximadamente al 15% del calentamiento

global (Lelieveld et al. 1993). La concentración del metano en la atmósfera se incrementa mucho más rápido que la del CO₂ y otros gases, aumenta a una tasa del 1% al año (Moreno y Niell, 2008).

Según la Organización de las Naciones Unidas (2015), el objetivo número siete del Desarrollo del Milenio consiste en garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. Las industrias están en la necesidad de incorporar la variable ambiental y de esta manera disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano y el dióxido de carbono (COVENIN-ISO 14001, 2002).

Cabe destacar que Destilerías Unidas S.A. (DUSA), empresa dedicada a elaborar productos alcohólicos, realiza su proceso de destilación a partir de melazas y mostos fermentados, generando alcohol etílico (etanol) y altos volúmenes de vinaza, que de acuerdo con los reportes de laboratorio en la empresa, en cuanto a su caracterización, es un desecho ácido (pH entre 3.5 - 5.7), con alto contenido de materia orgánica (DQO entre 15.000 – 176.000 mg/L), representando un riesgo ambiental si es vertida directamente en un cuerpo de agua natural. Ante esta situación, en DUSA la vinaza es tratada biológicamente en dos digestores

anaeróbicos con capacidad de 9.000 m³, para disminuir el contenido de materia orgánica y obtener biofertilizante, además que se produce biogás y lodo, explica Fernandez (2003), mediante un estudio prediagnóstico.

El biogás de la empresa está compuesto por 65% de metano (CH₄), 31% de CO₂, 3% de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), 0,80% Nitrógeno (N₂) y 0,20% Vapor de Agua (H₂O), el flujo promedio del biogás al mechurrio es de 800 Nm³/h a una alimentación de 9 L/s. Además, la empresa posee calderas que suministran vapor saturado y vapor sobrecalentado a las turbinas generadoras de energía calorífica y energía eléctrica respectivamente, las calderas son alimentadas con combustibles derivados del petróleo en la empresa (Fernández, 2003).

La evaluación del uso del biogás como combustible en sistemas de generación de vapor es una práctica que permite optimizar el aprovechamiento de los desechos agroindustriales. La sustitución parcial o total del combustible fósil usado en la caldera por biogás disminuye el impacto ambiental ocasionado en la combustión del gasoil, la quema del gas natural no produce ceniza, ni SO₂ y la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) es mínima, solamente existe la emisión de CO₂

(producto normal de la combustión), tomando en cuenta que el biogás tiene características similares en cuanto al contenido de metano al gas natural (Valderrama, 2002).

La importancia del estudio se enmarca en lo económico, tecnológico, científico y social. Se disminuirían costos de combustible fósil (gasoil) derivado del petróleo, además de minimizar los gases de efecto invernadero generados en la producción de gasoil. Diseñando a escala de laboratorio S.A.G.M., el estudio proporciona información que al ser llevada a escala real sirve como nuevo objetivo para el mejoramiento continuo del sistema de gestión ambiental implantado en la empresa. La aplicación de la ciencia ambiental al utilizar residuos como fuente de energía. Los resultados podrán ser utilizados para diseñar planes y programas en el campo ambiental.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general: la evaluación de un sistema de aprovechamiento del gas metano (S.A.G.M.) generado en el proceso de digestión anaeróbica de la vinaza como combustible para calderas en Destilerías Unidas S.A (DUSA). Además, comprende los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar el biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica de la vinaza.
2. Diseñar

a escala de laboratorio el sistema de aprovechamiento del gas metano presente en el biogás. 3. Determinar la eficiencia de cada unidad del sistema de aprovechamiento del gas metano.

MATERIALES Y MÉTODOS

La composición química de la vinaza es variada y está afectada por la naturaleza la materia prima, entre otros. En promedio, por cada litro de alcohol se obtienen entre 12 y 15 litros de vinaza (Subiros, 2000). El tratamiento aplicado a la vinaza del estudio fue digestión anaeróbica, consiste en un proceso donde se convierte biológicamente la materia orgánica, bajo condiciones anaerobias, en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), mediante la acción de bacterias. Por cada kg de demanda bioquímica de oxígeno estabilizada (DBOL) se producirán 0,25kg de metano, que equivalen a 350L (Metcalf y Eddy, 1996).

Según Castells (2012), existe la posibilidad de depurar el biogás para obtener un gas con mayor concentración de metano, puede comprimirse para ser vendido como combustible. Por su contenido de metano, el biogás puede utilizarse en cocinas, lámparas de iluminación, calefacción, refrigeración, motores de combustión interna y calderas.

Métodos de purificación utilizados en el trabajo de investigación

Unidad para remover sulfuro de hidrógeno (H_2S): método de purificación por adsorción, utilizando carbón activado a partir de desechos, el biogás es tratado en una columna, operando en discontinuo. Unidad para remover dióxido de carbono (CO_2): método de purificación por absorción, utilizando solución alcalina contenida en una columna en discontinuo (Montalvo y Guerrero, 2003).

El biogás obtenido en la digestión anaeróbica de la vinaza es purificado para obtener un gas con mayor composición de metano y disminuir el contenido de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, aprovechando el potencial energético de este combustible en la alimentación de las calderas de la empresa DUSA.

La caldera es un recipiente en el cual tiene lugar la vaporización continua del agua, mediante aporte de energía calórica obtenida de un combustible. Es una fuente de energía de transporte a distancias cortas, con numerosas aplicaciones industriales (Rigola, 1990).

Materiales, equipos, soluciones y reactivos

Balanza digital, Matraz Erlenmeyer; Mangueras de plástico 3/8 pulgadas, Tapones horadados,

Fibra de vidrio, Papel film, Plancha de agitación calentamiento, Bureta, Tubo plástico PVC, Agitador magnético, Cilindro graduado, Vaso de precipitado. Vinaza, Biomasa, CaO, Acetato de zinc 0,02N, Yodo 0,02N, HCL 6N, Solución de almidón 3%, Fenolftaleína, NaOH 0,02N y Tiosulfato de sodio 0,025N

Procedimiento

Lugar de estudio: Destilerías Unidas S.A. (DUSA). Laboratorio fisicoquímico y planta de tratamientos de efluentes industriales, donde es tratada la vinaza para obtener biofertilizante.

El análisis del biogás producido se realizó en el S.A.G.M., el cual replicó las condiciones reales del sistema de tratamiento anaeróbico de la empresa. La caracterización del biogás para ser precisa debe consistir en la medición de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua (H₂O), (Montalvo y Guerrero, 2003). Para analizarse se utiliza cromatografía de gases siguiendo la metodología estándar.

Cabe destacar que no se contó con los recursos económicos para dicho análisis de cromatografía por lo tanto se procede a realizar burbujeo del biogás generado en la digestión anaeróbica en un cilindro graduado lleno de 290 mL de agua para posteriormente titular la

muestra y obtener la concentración de sulfuros (S²⁻) y CO₂ de forma independiente, expresando los resultados en mg/L.

El análisis de sulfuros se adicionó en una Matraz de Erlenmeyer 8 gotas de acetato de zinc 0,02N, 5 a 10 mL de yodo 0,02N dependiendo del contenido de sulfuros, 2mL de ácido clorhídrico 6N, posteriormente se agregó la muestra de 200mL de agua burbujeada, si el color permanecía amarillo se procedía a titular de lo contrario se vuelve agregar yodo hasta obtener una coloración amarilla. Se colocaron cinco gotas de solución de almidón 3% para titular con tiosulfato de sodio 0,025N hasta el punto de viraje de un color azul a incoloro como es el color natural del agua. Sensibilidad del método: muestras que contengan más de 1 mg/l de sulfuros (APHA-AWWA-WEF, 2005).

Se calcularon los mg de sulfuros / L mediante la siguiente formula:

$$mg \text{ sulfuros } / L_{\square} = \left(\frac{[(A * B) - (C * D)] * 16000}{ml \text{ de muestra}} \right) A =$$

mL de yodo

B = normalidad de la solución de yodo

C = mL de tiosulfato de sodio

D = normalidad de tiosulfato de sodio

En cuanto al análisis de dióxido de carbono se tomaron entre 75 a 100 mL de muestra de agua burbujeada, se adicionaron 6 gotas de

fenolftaleína, si aparece un color rosado la muestra no contiene CO₂, de lo contrario titular rápidamente con hidróxido de sodio 0,02N agitando lo menos posible, el punto final lo indica la aparición de un color rosado que persiste por más de 10 segundos (APHA-AWWA-WEF, 2005).

Para finalizar se calcularon los mg/L de CO₂ mediante la siguiente fórmula:

$$\text{mg/L de CO}_2 = \left(\frac{A * N * 44000}{\text{ml de muestra}} \right)$$

A = mL de hidróxido de sodio utilizados

N = normalidad de hidróxido de sodio

Antes de realizar los análisis de sulfuros y dióxido de carbono, se realizó una titulación del agua para obtener el blanco, tanto para el análisis de sulfuros como para el análisis de dióxido de carbono, el resultado obtenido se restó al resultado de las muestras de agua burbujeada con el biogás para corregir el aporte de sulfuros y dióxido de carbono que tenía el blanco y poder obtener mayor precisión. Antes de comenzar el proceso de burbujeo y al finalizar previo a la titulación de la muestra de agua, se midió el pH para obtener el grado de acidez o basicidad que los compuestos del biogás aportaron durante su disolución en agua.

Diseño y construcción del sistema de aprovechamiento del gas metano a escala de laboratorio (S.A.G.M.). Figura 1 y Figura 2.

Construcción del digestor anaeróbico: se utilizó un recipiente cerrado con capacidad de 6 L de vinaza (fiola de 6 L, cerrada con tapón de goma), agitación mecánica y control de temperatura mediante un termómetro y una plancha de agitación/calentamiento a 50 °C y 100 revoluciones por minuto (rpm). Manteniendo la temperatura del sistema entre 30 – 38 °C (rango de temperatura mesófilo), pH de la vinaza se ajustó entre 6,8 - 7,2 para neutralizar, agregando 10 g aproximadamente de óxido de calcio.

Se agregó como inóculo 20 g/L de biomasa proveniente del sistema de tratamiento de efluentes en la empresa, al utilizar 6 litros de vinaza se adicionaron 120 g de biomasa al proceso. El proceso de aclimatación es de 24 horas posteriormente la biomasa se adapta en 1 hora al cambiar sustrato (vinaza). La biomasa aclimatada al finalizar el proceso de digestión anaeróbica se dejó precipitar durante 1 hora y 30 minutos para ser usada en los siguientes montajes.

Análisis cualitativos del proceso de digestión anaeróbica a escala de laboratorio y medición del pH de la vinaza: se observó el color,

aparición de la vinaza cruda y después del tratamiento, medición del pH de la vinaza antes y al finalizar el proceso.

Construcción de las unidades de purificación del biogás de acuerdo a Montalvo y Guerrero (2003):

Unidad para remover sulfuro de hidrógeno (H_2S): se empleó un proceso de adsorción sólido-gas, que consistió en una columna de plástico PVC de 0,15 m de altura (17,8cm) y 1 pulgada (2,5cm) de diámetro, de los 17,8cm de altura, 15cm los comprende la columna de adsorción rellena de carbón activado y el resto (1,4 cm de ambos lados) fue ocupado por dos tapones horadados y fibra de vidrio para retener el relleno. Se utilizó 36,5 g de epicarpio o exocarpio de *Cocos nucifera* (concha de coco) con tamaño de partícula entre 0,150 – 0,178 mm y densidad 0,5 g/mL (proveedor Carbac C.A.). El biogás es inyectado en flujo a contracorriente por la parte inferior de la columna, la presión de la corriente de flujo del biogás es cercana a la obtenida en el digestor anaeróbico.

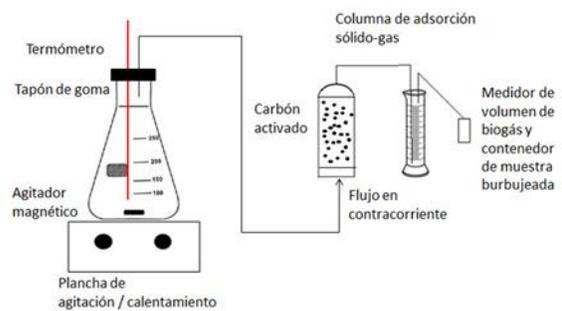


Figura 1. S.A.G.M., empleando la columna de adsorción sólido-gas

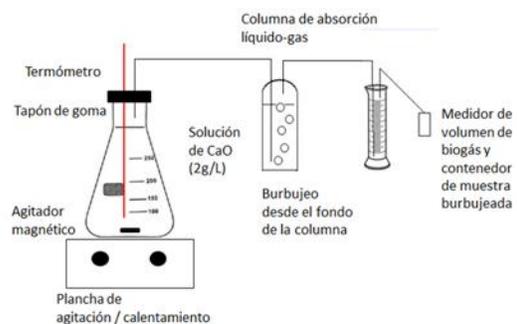


Figura 2. S.A.G.M., utilizando la columna de absorción líquido-gas.

Unidad para remover dióxido de carbono (CO_2): se utilizó un proceso de absorción líquido-gas, que consistió en una columna de vidrio (Matraz Erlenmeyer o fiola) con capacidad de 1 L de agua de cal, se adiciona 2g de cal (óxido de calcio) en un litro de agua, se burbujeó el biogás en la solución alcalina desde el fondo del recipiente para eliminar el CO_2 . Se midió el pH del agua con cal antes y después del proceso de burbujeo.

Caracterización del biogás obtenido en el agua burbujeada después de colocar las

columnas de adsorción sólido-gas y absorción líquido-gas

Se realizó aplicando la misma metodología descrita en la caracterización del biogás obtenido en la digestión anaeróbica, anteriormente.

Medición del volumen del biogás producido en la digestión anaeróbica y del biogás tratado en el S.A.G.M., es decir después de cada columna de adsorción y absorción. Se realizó mediante desplazamiento de líquido, utilizando un sistema de recolección que consistió en un cilindro graduado lleno de agua, la parte superior del cilindro está conectado mediante una manguera al digester anaeróbico o a la unidad de purificación de H₂S o CO₂. A medida que se produjo la entrada del biogás al cilindro ocurre desplazamiento del líquido, el cual se va descartando por una conexión en la parte superior, permitiendo la lectura en el cilindro graduado de la cantidad de gas producido (Rincón, 2011).

Determinación de la eficiencia de cada unidad del sistema de aprovechamiento del gas metano.

La eficiencia de cada unidad se midió determinando la concentración del gas antes y después de la unidad de purificación,

posteriormente se aplicó la siguiente fórmula:

$$\%E_{\text{unidad}} = \left(\frac{C_{\text{gas-entrada}} - C_{\text{gas-salida}}}{C_{\text{gas-entrada}}} \right) \cdot 100$$

E: Eficiencia de unidad

Unidad: columna de separación de H₂S o CO₂,

C_{gas}: Concentración de H₂S o CO₂

Técnicas de procesamiento estadístico para el análisis de datos

Durante la investigación se realizó tres repeticiones para obtener la caracterización de sulfuros y dióxido de carbono presente en el biogás obtenido en la digestión anaeróbica de la vinaza a escala de laboratorio cada una de un tiempo de residencia entre 4 y 5 días. Posteriormente se realizaron tres repeticiones para caracterizar el biogás luego de ser tratado en la columna de adsorción sólido – gas, rellena de carbón activado a partir de concha de coco con un tiempo de residencia de 7 días. Y por último tres repeticiones para caracterizar el biogás luego de ser tratado en la columna de absorción líquido – gas, compuesta de agua de cal 2 g/L en un tiempo de residencia entre 4 y 5 días.

Se considera un tamaño de muestra n = 3 para los análisis antes del tratamiento y para los análisis después del tratamiento de purificación tanto en la columna de adsorción como en la

columna de absorción con la finalidad de homogeneizar el tamaño de la muestra además del tiempo que se necesitaba para hacer cada análisis, debido a que cada uno se realizaba en una semana y las muestras son del tipo destructivas, es decir luego de ser utilizadas no se podían recuperar.

Los resultados fueron analizados mediante estadística descriptiva usando el software Statgraphics Centurión para obtener promedio y desviación estándar. A partir de los datos obtenidos se realiza una prueba de hipótesis para dos medias conocidas y con tamaño de muestra n_1 y n_2 pequeñas, es decir $n < 30$ lo cual conlleva a utilizar la distribución t (Walpole et al. 2012). Con un nivel de confianza establecido 99%, nivel de significancia 1%, por lo tanto, $\alpha = 0.01$ y el estadístico de prueba siguiente:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{(X_1 - X_2) - d_0}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1}\right) + \left(\frac{1}{n_2}\right)}}$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Grados de libertad $v = n_1 + n_2 - 2$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previo a la evaluación del reactor anaeróbico en el S.A.G.M., se realizó el proceso de

aclimatación de la biomasa por un período de una semana, se observó que las bacterias anaeróbicas produjeron biogás al cabo de 24 horas de inoculado el reactor, debido a la degradación de la materia orgánica presente en la vinaza que sirvió de sustrato para los microorganismos. La producción de biogás comenzó luego de 1 hora de iniciarse el proceso de adición del nuevo sustrato, retirando previamente el que había sido degradado. Cuando este comportamiento se mantuvo estable en el tiempo, se decidió que la biomasa se encontraba aclimatada a las características de la vinaza, por lo que se iniciaron las pruebas del S.A.G.M. La biomasa aclimatada se dejó precipitar durante 1 hora y 30 minutos para ser usada en los siguientes montajes.

Durante el proceso de aclimatación y arranque del digester anaeróbico, el volumen promedio de biogás obtenido fue de 42,5 mL, generado en un período promedio de 4 - 5 días a partir de 6 L de vinaza. Como se indicó en la metodología, la medición del gas producido se realizó mediante el método del desplazamiento y su disolución en agua (pH 6,8), se observó que su pH disminuyó hasta 5,5; producto de la disolución del dióxido de carbono y del sulfuro de hidrógeno presentes en el biogás. Hernández (1996), en sus investigaciones obtuvo un

comportamiento similar, observó que el pH del agua donde burbujeaba el biogás disminuyó por efecto de la acidificación causada por la disolución del CO₂ en el agua. Los sulfuros son menos solubles con relación al CO₂; sin embargo, no se descarta que también haya ocurrido, aunque fuera en menor grado su disolución, contribuyendo a la disminución del pH del agua donde se burbujeó el biogás.

El contenido de sulfuros y dióxido de carbono diluidos en el agua burbujeada dependió del volumen de biogás producido, el cual aumentó, al incrementar el volumen de vinaza tratada, aspecto importante al realizar posteriormente la caracterización y evaluación del S.A.G.M.

Finalmente, los análisis cualitativos de la vinaza mostraron que el pH de la vinaza cruda fue de 4.4; el color de la vinaza cruda era marrón oscuro brillante, luego del tratamiento anaeróbico se observó que ocurrió un cambio de color a marrón claro con pérdida de brillo, y el pH de la vinaza neutralizada con óxido de calcio se acidificó desde valores de 7,1 hasta valores promedio de 5,0.

La caracterización de los dos componentes principales del biogás generado en el S.A.G.M., se muestra en el Cuadro 1. Al emplear 6 L de vinaza el contenido de sulfuros fue de 4,89

mg/L, mientras que para el análisis de dióxido de carbono la concentración fue de 296,03 mg/L, en ambos casos se observó una baja variabilidad con respecto a la media, por lo que se consideró que el volumen de vinaza utilizado era suficiente para cuantificar el contenido de sulfuros y dióxido de carbono durante la investigación.

Cuadro 1. Caracterización del biogás generado en el S.A.G.M., a escala de laboratorio

Constituyente del biogás	Concentración (mg/L) (X ± DE)	Tiempo de residencia hidráulica (TRH)
[S ²⁻]	4,89 ± 1,90	4 - 5 días
[CO ₂]	296,03 ± 60,14	4 - 5 días

X: promedio; DE: Desviación estándar

En estudios preliminares se usó 1 L de vinaza y se obtuvo que el biogás contenía $1 \pm 0,7$ mg/L de sulfuros y $50,91 \pm 79,65$ mg/L de CO₂. Sin embargo, entre las repeticiones realizadas se observó una alta variabilidad de los resultados por lo que se decidió aumentar el volumen del sustrato para obtener mayor precisión. Esto debido a que los métodos disponibles en esta investigación para la determinación de sulfuros y CO₂ son volumétricos, lo cual disminuye su sensibilidad con respecto al método cromatográfico.

Evaluación del sistema de aprovechamiento del gas metano (S.A.G.M.)

Para la realización de los montajes del S.A.G.M. en vista de que no se contaba con una producción suficiente de biogás para que fluyera por las dos columnas, se optó por realizar el experimento de manera independiente.

La bibliografía señala que las columnas no son exclusivas para remover cada gas de forma selectiva (Montalvo y Guerrero, 2003), a pesar de esto, cada una tiene mayor afinidad por un gas que por otro, sin embargo, ambas columnas han reportado remociones tanto de H₂S como de CO₂.

El pH del agua donde se burbujeó el biogás purificado (después del tratamiento) no disminuyó, como lo hizo cuando no se usó columna de purificación, en la sección de aclimatación de la biomasa y puesta a punto del

digestor anaeróbico se mencionó que el pH del agua antes de ser burbujeada es de 6,8 en promedio y luego de colocar las columnas de purificación para el caso de la columna de adsorción sólido-gas el pH aumento a 7,12 y en la columna de absorción líquido-gas el pH incremento a 7,26; esto indica que la corriente gaseosa luego de ser tratada no contenía CO₂ y H₂S en gran proporción.

Al analizar la columna de absorción líquido-gas la solución de óxido de calcio (2 g/L) donde se hizo burbujear el biogás obtuvo un pH de 11,67 y después del burbujeo disminuyó a 6,12; evidenciando que al disolverse los compuestos del biogás el medio se acidifica, debido a la formación de bicarbonatos y carbonatos principalmente por el CO₂ disuelto; por la naturaleza alcalina de la solución de óxido de calcio se absorbe H₂S y CO₂ (Montalvo y Guerrero, 2003).

Cuadro 2. Eficiencia en la remoción de sulfuros y CO₂ en el S.A.G.M.

Constituyente del biogás	Columna adsorción sólido-gas		Columna absorción líquido-gas	
	Concentración (mg/L) (X ± DE)	% Remoción	Concentración (mg/L) (X ± DE)	% Remoción
S ²⁻	4,65 ± 0,55	4,90	3,87 ± 0,42	20,86
CO ₂	5,45 ± 2,83	98,16	12,49 ± 8,02	95,78

X: promedio, DE: Desviación estándar

En el Cuadro 2, se detalla la concentración de sulfuros y CO₂ luego de hacer pasar el biogás por las columnas del S.A.G.M., así mismo se reflejan las eficiencias en la remoción de los contaminantes de cada columna de purificación. Los resultados muestran que la concentración de sulfuros luego del tratamiento en la columna de adsorción sólido-gas en promedio fue de 4,65 mg/L con una desviación estándar de 0,55; lo cual representa una homogeneidad alta con respecto a la media. Mientras que al utilizar la columna de absorción líquido-gas, se obtuvo una concentración de sulfuros, ligeramente inferior (3,87 mg/L) manteniendo la baja variabilidad respecto a la media.

La remoción de sulfuros obtenida en la columna de adsorción sólido-gas fue de 4,90%, mientras que en la columna de absorción líquido-gas fue superior, lográndose remover el 20,86% de los sulfuros presentes en el biogás. Los porcentajes de remoción fueron muy bajos, indicando que las columnas probadas no fueron eficientes para la remoción de H₂S. Es factible que la baja sensibilidad del método volumétrico utilizado para la medición de sulfuros también haya influido en la evaluación de las columnas. Sin embargo, el estudio de la purificación del biogás en DUSA se requiere para conocer si es posible usarlo como combustible para las

calderas, es decir, alimentar un motor estacionario.

En relación al CO₂ se observa en el Cuadro 2, que el contenido del dióxido de carbono luego del tratamiento en la columna de adsorción sólido-gas fue de 5,45 mg/L de CO₂. Ahora bien, luego del tratamiento utilizando la otra columna (absorción líquido-gas) se obtuvo una concentración final de 12,49 mg/L de CO₂. La eficiencia obtenida para remover el dióxido de carbono en la columna de adsorción sólido-gas fue de 98,16%, mientras que para la columna de absorción líquido-gas la eficiencia fue ligeramente inferior (95,78%). Para ambas columnas se evidencia una alta remoción de dióxido de carbono.

Con un nivel de confianza del 99%, existen pruebas suficientes para demostrar que se disminuye el contenido de CO₂ significativamente en el S.A.G.M. usando la columna de absorción líquido-gas. Para el caso del sulfuro de hidrógeno tanto en la columna de adsorción sólido-gas como en la columna de absorción líquido-gas, no existen evidencias significativas para probar que se disminuye el contenido de H₂S en el S.A.G.M.

Al respecto, estudios reportados por Llana et al. (2010) han encontrado que los requerimientos de pureza del biogás para

calderas convencionales de gas pueden ser ajustado para funcionar con biogás, modificando el ratio aire/gas y disminuyendo el contenido de H₂S a valores menores de 1000 mg/L (1000 ppm) además de mantener el punto de rocío en 150°C. Por su parte Conil (2000) estableció que, para eliminar el riesgo de corrosión de los motores, en particular de las piezas de cobre y de bronce en contacto con el aceite del motor; es necesario reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás a 200 mg/L (ppm), lo cual respalda que el contenido de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás sin tratar y purificado está por debajo de los parámetros citados.

Según los parámetros señalados por Llaneza et al. (2010) y Conil (2000), en el caso de remoción de sulfuros en las dos columnas de purificación, las exigencias de pureza para alimentar las calderas se cumplen, es decir que con los resultados obtenidos de sulfuros antes y después del tratamiento de purificación en el S.A.G.M. se puede alimentar las calderas de la empresa DUSA, debido a que según los autores debe ser menor a 1000 mg/L de sulfuros y se obtuvo 4,65 y 3,87 mg/L de sulfuros en la columnas de adsorción sólido-gas y absorción líquido-gas respectivamente. En cuanto al CO₂ en la columna de adsorción sólido-gas y en la columna de absorción líquido-gas, existen

pruebas suficientes para demostrar que se disminuye el contenido de CO₂ significativamente en el S.A.G.M.

Según Llaneza et al. (2010) el contenido de CO₂ en el biogás purificado para alimentar motores estacionarios (en este caso calderas) no debe contenerlo porque se disminuye el poder calorífico del metano, es recomendable la aplicación de altas temperaturas al momento de usar el biogás (>800°C) debido a que en estas condiciones el CO₂ no inhibe el proceso electroquímico; los porcentajes de remoción de CO₂ en ambas columnas (Cuadro 2,) fueron altos y cercanos al 100%, es decir que la purificación del biogás obtenido en el estudio respecto al CO₂ fue significativa.

En base a lo argumentado y comparando los resultados obtenidos, la purificación del CO₂ es significativa, en ambas columnas se logró la remoción por encima de 95%, de esta manera se cumplen los requerimientos teóricos para alimentar un motor estacionario (una caldera). Por ello se recomienda implementar las columnas utilizadas en la investigación para llevar a escala industrial la purificación del biogás, siendo el dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno los compuestos más contaminantes.

En ambos tratamientos existe remoción de sulfuros y de dióxido de carbono, observando

mayor selectividad de los materiales usados en cada columna con el dióxido de carbono. Lo anteriormente explicado es contrario a la teoría propuesta por Montalvo y Guerrero (2003), donde la columna adsorción sólido-gas es selectiva en mayor proporción al sulfuro de hidrógeno, se puede explicar que esto se debe a varios factores como la utilización de carbón activado a partir de concha de coco con granulometría diferente a la planteada por los autores, selectividad del carbón activado empleado y baja producción de biogás.

Según Montalvo y Guerrero (2003), en el proceso de disolución de CO_2 (g) y H_2S (g) en soluciones alcalinas al alcanzarse las condiciones de equilibrio es de esperar que se disuelva una mayor cantidad de CO_2 que de H_2S , consumiéndose preferentemente el álcali en absorber el CO_2 (como es el caso de la columna de absorción líquido-gas rellena de agua y cal 2 g/L). La viabilidad del proceso de absorción selectiva del H_2S queda a expensas de las velocidades del proceso físico de transferencia de materia y disolución de ambos gases.

El biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica de la vinaza en Destilerías Unidas S.A (DUSA) debe seguir siendo estudiado con el propósito de ser aprovechado como combustible en las calderas de la misma

empresa, para ello es sumamente importante realizar el análisis de cromatográfico de gases para cuantificar el contenido de metano, en caso de ser mayor a 60% sus posibilidades como combustibles son grandes (Hernández, 1996), y antes de utilizarlo es necesario la purificación del biogás utilizando el S.A.G.M. propuesto en la presente investigación, eliminando principalmente los contaminantes estudiados sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono para obtener un biogás con alto porcentaje de metano, mayor a 90% (como límite cercano al gas natural) y alimentar las calderas de la empresa, disminuyendo el consumo de combustible fósil (gasoil) que se tiene actualmente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La caracterización del biogás producido durante la digestión anaeróbica de la vinaza arrojó 4,89 mg/L de sulfuros y 296,03 mg/L de CO_2 .

El sistema de aprovechamiento del gas metano quedó conformado por un reactor anaeróbico de 6 L, un medidor de volumen de biogás producido, seguido de una columna de adsorción sólido-gas compuesta por carbón activado obtenido de concha de coco con tamaño de partícula entre 0,150 – 0,178 mm ó una columna de absorción líquido-gas rellena de solución acuosa de CaO_2 g/L.

Las eficiencias de remoción de sulfuros fueron de 4,90% en la columna de adsorción sólido-gas y 20,86% en la columna absorción líquido-gas. Las eficiencias de remoción de CO₂ para la columna de adsorción sólido-gas 98,16% y 95,78% en la columna de absorción líquido-gas.

El tratamiento usado para remover H₂S no fue eficiente, sin embargo, el biogás desde su inicio cumple con las exigencias para alimentar las calderas de la empresa DUSA en relación con el contenido permitido de H₂S. El S.A.G.M. fue eficiente para la remoción de CO₂ por lo que puede ser usado en la empresa para purificar el biogás y emplearlo como combustible en sus calderas.

De acuerdo con los resultados de la investigación se recomienda:

Realizar el análisis de cromatografía de gases para caracterizar el biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica de la vinaza y el posteriormente caracterizar el biogás obtenido después del tratamiento de purificación, de esta manera se podría obtener resultados más precisos donde se analice vapor de agua además del contenido de metano, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono como los principales contaminantes.

Aumentar la capacidad del digester anaeróbico y utilizar más cantidad de vinaza

para obtener mayor volumen de biogás y lograr un mejor flujo en el S.A.G.M. a escala de laboratorio, de esta manera se podría hacer el experimento haciendo pasar el biogás por las dos columnas estudiadas, en vez de realizar el análisis por separado. Además, esto permitiría mayor precisión para utilizar la técnica de medición de volumen de biogás por desplazamiento de líquido.

Al diseñar la columna de adsorción sólido-gas las eficiencias de sulfuros pueden ser mejoradas utilizando carbón activado con una granulometría mayor a la empleada en el estudio que fue de 0,15 – 0,17 mm, se recomienda utilizar carbón activado a partir de concha de coco con granulometría entre 0,25 – 0,80 mm (Montalvo y Guerrero, 2003).

AGRADECIMIENTOS

Destilerías Unidas S.A. (DUSA). Empresa donde se realizó el trabajo de investigación. Dra. María Pire (Tutora Académico), Ing. Pedro Guanipa (Tutor Industrial), Dra. Marisela Estanga y Esp. Isabel Hernández (Asesores Metodológicos).

REFERENCIAS

APHA-AWWA-WEF AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. (2005). *Stándar Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (21th. ed.). Whashintong D.C. Estados Unidos.

- Bosch, R. (2005). Manual del automóvil. (4ª ed.). Alemania: Karl-Heinz Dietsche, p. 550-551.
- Castells, X. (2012). Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid: Díaz de Santos, p. 606,755-756.
- Conil, P. (2000). El aprovechamiento del biogás de las lagunas de estabilización: perfil del proyecto "Palmeiras" en Tumaco (Colombia). [Artículo en línea]. Disponible: publicaciones.fedepalma.org Consulta: 2022, julio 15.
- Elías, X. (2012). Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradoras. (2ª ed.). Madrid: Díaz de Santos, p. 18.
- Fernández, M. (2003). Aprovechamiento del biogás producido en la planta de tratamientos de Destilerías Unidad S.A. [Informe de Pasantías]. Universidad Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Vicerrectorado Barquisimeto, Venezuela.
- Garrido, N., Navarro, H. Díaz, Manuel. Y Pérez, I. (2010). Evaluación de alternativas de producción de levadura forrajera a partir de vinazas mediante simulación Super Pro Designer. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe. Disponible: <http://www.redalyc.org> Consulta: 2022, julio 15.
- Larrahondo, J., Morales, A., Victoria, H. (2000). Compuestos orgánicos en vinaza. Carta Trimestral. Cenicaña, 22 (3). Disponible: <http://www.cenicana.org> Consulta: 2022, julio 15.
- Llaneza, H.; Morís, M.; González. L. (2010). Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. PSE PROBIOGAS. Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España.
- Lelieveld, J., Crutzen, P. y Brühl, C. (1993). Climate effects of atmospheric methane. Chemosphere, 26 (4).
- Metcalf & Eddy. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y Reutilización. (Tomo1). México: McGraw – Hill, p. 480 y 484.
- Montalvo, S. y Guerrero, L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, p. 383-384, 387, 391, 393, 400, 402-405.
- NORMA VENEZOLANA COVENIN 3340. (1997). Bebidas alcohólicas.
- NORMA VENEZOLANA COVENIN- ISO 14001. (2002). Sistema de gestión ambiental especificación para su uso.
- Normativa Ambiental Venezolana. Decreto N° 883 (1995). Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 5.021 (Extraordinaria), 18-12-1995.
- Rudolph, M. (2005). Química orgánica simplificada. España: Reverté, p. 61 – 62.
- Sabino, C. (1992). Recirculación de vinazas tequileras en la fermentación alcohólica. [Tesis en línea]. Universidad de Guadalajara, México. Disponible: <http://biblioteca.cucba.udg> Consulta: 2022, julio 15.

Subiros, F. (2000). El cultivo de la caña de azúcar. Costa Rica: EUNED, p. 362-363.

Walpole, R.; Myers, R; Myers, S. y Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. (9na. Ed.). Pearson Educación: México.