



# FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE BIOGÁS

C. C. Carías<sup>1</sup>, A. A. Ibarra<sup>2</sup>, S. G. Martínez<sup>3</sup>, D. E. Reyes<sup>4</sup>, I. A. Sánchez<sup>5</sup>

Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas, UCA, San Salvador, El Salvador

Teléfono (503) 7922-6051 E-mail: 00022314@uca.edu.sv

Teléfono (503) 7883-4298 E-mail: 00022114@uca.edu.sv

Teléfono (503) 7081-5406 E-mail: 00019514@uca.edu.sv

Teléfono (503) 7790-3119 E-mail: 00054312@uca.edu.sv

Teléfono (503) 7885-6667 E-mail: isanchez@uca.edu.sv

**Resumen** — El presente documento es una recopilación de datos, información, análisis y resultados obtenidos en el diseño y la evaluación de la factibilidad técnica y económica de dos metodologías y tecnologías que permitan almacenar el biogás producido en un biodigestor de pequeña escala, como el biodigestor de la granja del Instituto Nacional Dr. Francisco Martínez Suárez de Chalatenango (INFRAMS) de El Salvador, con el objeto de validarlas y reproducirlas en otros escenarios similares. El diseño consta de un sistema compuesto por tres etapas: limpieza, compresión y almacenamiento. De acuerdo a la evaluación técnica y económica, se determinó que la mejor tecnología para el almacenamiento y transporte de biogás es la mochila de biogás, siendo justificado el costo de su implementación.

**Palabras Clave** – Almacenamiento a presión, almacenamiento volumétrico, biogás, biometano, compresión, GLP.

## I. INTRODUCCIÓN

El biogás es uno de los productos que se obtienen de la digestión anaeróbica de material orgánico. Su composición depende principalmente del tipo de biomasa y biodigestor utilizados en el proceso, siendo esta por lo general, 50% - 70% metano (CH<sub>4</sub>), 30% - 40% dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 0% - 1% sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y otros elementos en bajas concentraciones como hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) [1].

Dentro del marco del desarrollo de las energías renovables, el aprovechamiento de la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica para producir biogás ha sido siempre una propuesta energética de mucho interés, la cual es una opción amigable con el medio ambiente dado que permite la disposición adecuada de la materia orgánica y constituye una solución sustentable y renovable que permite disminuir la dependencia de la explotación y uso de los combustibles fósiles como el Gas Licuado del Petróleo (GLP), gasolina y diésel. Actualmente, los biodigestores se aprovechan a diferentes escalas a nivel mundial y con distintas aplicaciones, tanto calóricas como eléctricas, variando desde baja escala, como sucede en zonas rurales y pequeñas granjas, hasta gran escala como en la agroindustria.

Sin embargo, su uso no está ampliamente difundido debido que las propias características termodinámicas del biogás,

principalmente las del metano (CH<sub>4</sub>), no han permitido la utilización de un sistema factible y reproducible de almacenamiento y transporte del mismo. Esto plantea la necesidad de estudiar alternativas que no limiten el uso in situ del biogás al ritmo de producción.

Para ello se requieren dos pasos fundamentales: la limpieza de los compuestos innecesarios, que no aportan energía y son adversos para la integridad física de las personas y de los equipos, y el almacenamiento del biometano.

### A. Limpieza de biogás

El CH<sub>4</sub> es el único de los componentes del biogás que puede ser convertido en energía eléctrica y/o mecánica, es por ello que se afirma que la capacidad calorífica del biogás depende principalmente del porcentaje de CH<sub>4</sub> presente [2].

Los demás componentes hacen que la calidad y eficiencia energética del biogás disminuyan, y algunos de ellos ocasionan inconvenientes operacionales en los distintos procesos de aprovechamiento. Por ello, el biogás usualmente necesita ser sometido a un tratamiento de purificación que disminuya las concentraciones de esos componentes y que permita obtener altas concentraciones de CH<sub>4</sub> [1].

### B. Almacenamiento de biogás

Una vez que el biogás ha pasado por un adecuado proceso de limpieza, se obtiene biogás de mayor calidad y potencial calórico, para el cual, el elemento predominante en su composición es el metano (CH<sub>4</sub>), dicho subproducto es conocido como biometano. El biometano, a presión atmosférica, tiene una densidad de energía inherentemente baja; por lo tanto, la forma más económica y eficiente de transportar biogás limpio por largas distancias es en forma comprimida.

1) *Almacenamiento a presión:* El almacenamiento a presión de biogás es el proceso mediante el cual se aumenta la presión de este con la finalidad de reducir su volumen para poder contener mayor masa de biogás en depósitos apropiados para dicho fin. El biogás comprimido (del inglés Compressed Biogas, o bien



CBG) es un método que consiste en insertar el biogás dentro de un recipiente cerrado con la ayuda de un equipo mecánico como un compresor, llevándolo a presiones alrededor de los 20,000 kPa (200 bar) a temperatura ambiente. La compresión a una presión más baja es posible, sin embargo se almacenaría o transportaría menos energía. [3] El CBG es el método más utilizado a nivel mundial para una amplia gama de aplicaciones como el almacenamiento para uso doméstico, automotriz, etc. [4].

El biometano, a presión atmosférica, tiene una densidad de energía inherentemente baja; por lo tanto, la forma más económica y eficiente de transportar biogás limpio por largas distancias es en forma comprimida. [5] El biometano se puede comprimir y almacenar en cilindros de gas a presión, lo que facilita su transporte. Típicamente, los cilindros y tanques de presión de acero, como los empleados para gases comerciales, se utilizan para el almacenamiento del biometano [3].

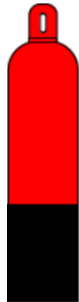


Fig. 1. Código de colores (norma NEO-05) para tanques de metano [6].

2) *Almacenamiento volumétrico:* Cuando las condiciones de presión y temperatura de almacenamiento del biogás presentan valores cercanos a los estándares, 101.35 kPa y 300 K respectivamente, se considera que se encuentra almacenado de forma volumétrica. Bajo estas condiciones se necesita mayor disponibilidad de volumen de almacenamiento para contener el biogás que si este se encontrara presurizado. Actualmente existen diversas maneras de conseguir el almacenamiento volumétrico del biogás, la mayoría de ellos a través de unidades comúnmente denominadas bolsas, las cuales presentan características específicas en cuanto a su geometría y materiales de fabricación.

El almacenador de geomembrana es fabricado de material de excelente calidad con resina 100% virgen de polietileno de alta densidad y específicamente diseñado para la producción de geomembranas flexibles. Está compuesta, aproximadamente, por un 97.5% de polietileno, 2.5% de humo negro, además de antioxidantes y termoestabilizadores. Estos tienen excelentes propiedades mecánicas, resistencia química y a agrietamiento ambiental, además de ser resistente a los rayos ultravioleta (UV).

Otra alternativa muy útil y bastante empleada en la industria es la Geomembrana fabricada con PVC. Esta es una buena opción para impermeabilizar losas de concreto (barreras de vapor); entre sus características se cuenta con excelente capacidad de sellado, resistencia química y apto para soldadura química o por calor [7].



Fig. 2. Mochila para transportar biogás.

## II. METODOLOGÍA

El estudio se dividió en dos grandes áreas de análisis descritas a continuación.

### C. Análisis técnico

Se diseñó un sistema de limpieza y uno de compresión a través de los cuales fluyera el biogás previo a su etapa de almacenamiento.

El sistema de limpieza permite reducir la presencia de gases no combustibles y otros elementos no deseados por medio de cuatro filtros principales: el filtro de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, humedad y particulado fino. De esta manera, gracias al sistema de limpieza se logra aumentar la concentración de metano en el biogás y la calidad de este, obteniendo lo que comúnmente se llama biometano.

En el sistema de compresión se aumenta la presión del biogás reduciendo su volumen, logrando así almacenar más masa de biogás en menor volumen y facilitar su almacenamiento y transporte.

En cuanto al almacenamiento, se evaluaron las alternativas del almacenamiento en cilindros adecuados, denominado almacenamiento a presión, y el almacenamiento en bolsas, denominado almacenamiento volumétrico, que para el caso se propuso el uso de neumáticos de camión y mochilas de biogás.

Para generar un diseño final del conjunto de sistemas (limpieza, compresión y almacenamiento), fue necesario determinar tanto el volumen de biogás diario a almacenar como la presión de almacenamiento más conveniente.

De esta manera se plantearon seis escenarios técnicos resumidos en la Tabla 1. Dichos escenarios se definían por la variación de dos parámetros: presión de compresión y volumen de biogás a comprimir.

Para las presiones de compresión se analizó 250 psi, por ser la presión a la que usualmente se comprime el biogás



según la bibliografía estudiada, y 125 psi, siendo esta la máxima presión a la que se puede operar el compresor más óptimo disponible en el mercado nacional.

Para los volúmenes de biogás a comprimir se analizó tres casos: 15 m<sup>3</sup>, si se desea comprimir la totalidad del biogás producido en el biodigestor del INFRAMS, 7.5 m<sup>3</sup>, para el caso en el que se comprima solo el biogás excedente del INFRAMS y 3.25 m<sup>3</sup> previendo que para los volúmenes anteriores, la operación y el mantenimiento de los filtros presentaría una mayor complejidad y un volumen menor sería más adecuado.

Tabla 1. Escenarios a analizar para el diseño de los componentes de los sistemas

No. Escenario	Presión manométrica en kPa (psig)	Volumen de biogás en m <sup>3</sup>
Escenario 1	1723.6 (250)	15.00
Escenario 2	1723.6 (250)	7.50
Escenario 3	1723.6 (250)	3.25
Escenario 4	861.8 (125)	15.00
Escenario 5	861.8 (125)	7.50
Escenario 6	861.8 (125)	3.25

Posteriormente, se diseñaron todos los elementos del sistema de filtración y compresión para las condiciones correspondientes a cada escenario para comparar los resultados entre sí y determinar, por medio de una matriz de selección de alternativas, el más adecuado a implementar en la granja del INFRAMS basado en criterios como la dimensión de los filtros, facilidad de operación y mantenimiento, entre otros.

Con ello resultaron dos escenarios favorables para la limpieza del biogás (escenario 3 y escenario 6) y un escenario óptimo para su compresión (escenario 2). Los escenarios 2 y 3 consideran una presión de compresión de 250 psi, siendo superior a la presión máxima nominal de compresores de hidrocarburos disponibles en el mercado nacional. Por lo que dichos escenarios fueron descartados. De esta forma el mejor escenario técnico resultante fue el escenario 6 (125 psig y 3.25 m<sup>3</sup>). Este escenario fue el que mejor se adecúa a la realidad nacional y a la situación específica en la granja del INFRAMS.

#### D. Análisis financiero

Para determinar los costos y beneficios generados de la implementación del sistema se realizó una evaluación económica basada en la tasa interna de retorno, la cual es una medida de la rentabilidad del proyecto, es decir, la ganancia que promete un proyecto de inversión a lo largo de su vida útil, y el período de recuperación de la inversión, que es el tiempo que tomará acumular las ganancias equivalentes al dinero invertido en el proyecto. Este análisis se efectuó a través de flujos de caja para una duración de 10 años, generados para cada una de las 3 tecnologías.

Los componentes considerados para la elaboración del flujo de caja fueron:

- 1) *Beneficio económico del GLP*: representa el ahorro obtenido de dejar de comprar GLP con un valor de \$455.52 anual para las 3 tecnologías.
- 2) *Costos de operación y mantenimiento*: considera el recambio de los filtros de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y particulado fino, energía eléctrica y mantenimiento del compresor con un valor de \$98.41 anual para las 3 tecnologías.
- 3) *Máquinas*: inversión inicial en compresor, presostato, manómetros y plancha de biogás, con un valor de \$1,141.70 para las 3 tecnologías.
- 4) *Mobiliario y equipo*: inversión inicial en tuberías, acoples, equipo eléctrico y almacenadores, por lo que no es igual para las 3 tecnologías, tomando un valor de \$1,063.12 para los cilindros, \$979.12 para los neumáticos y \$1,679.12 para las mochilas.
- 5) *Misceláneos*: incluye compra inicial de materiales y servicios como pegamentos, gel de sílice, equipo de protección personal y soldadura, con un valor de \$199.03 para las 3 tecnologías.
- 6) *Depreciación de máquinas*: es la pérdida del valor económico de las máquinas con el tiempo, con un valor de \$228.34 anual para las 3 tecnologías.
- 7) *Depreciación de mobiliario y equipo*: es la pérdida del valor económico de las máquinas con el tiempo, no es igual para las 3 tecnologías, tomando un valor anual de \$531.56 para los cilindros, \$489.56 para los neumáticos y \$839.56 para las mochilas.
- 8) *Valor de rescate*: representa el precio al que se podría vender las máquinas, mobiliario y equipo al acabar la vida útil del proyecto. Toma un valor de \$469.00 para las 3 tecnologías.

Una vez generados los flujos de caja para cada tecnología se procedió a analizar dos casos: inversión sin financiamiento e inversión con financiamiento.

El caso de la inversión con financiamiento es más complejo dado que involucra un préstamo el cual puede variar en su porcentaje de cobertura y la duración del mismo. Por ello se generaron 9 escenarios de financiamiento, considerando porcentajes de cobertura de 50%; 75% y 100% y duración del préstamo de 3, 5 y 7 años, con una tasa de interés del 10.69%. Esto para cada una de las tres tecnologías.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para las dos grandes áreas de análisis se describen a continuación.

#### E. Análisis técnico

Se diseñaron los sistema de filtración, compresión y almacenamiento para el caso de un volumen de biogás de



3.25 m<sup>3</sup> a una presión de compresión de 125 psig. El esquema del sistema se muestra en la Fig. 3.

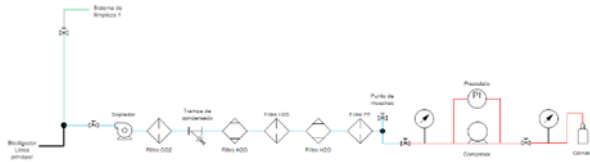


Fig. 3. Diagrama técnico del sistema.

La función, dimensiones y parámetros principales de los distintos componentes se detallan a continuación.

1) *Filtro de CO<sub>2</sub>*: Este filtro es el primer componente del sistema de limpieza. Se diseñó a base de una solución de cal hidratada y agua con la geometría presentada en la Fig. 4. Se utilizaron las estimaciones de Sang-Jun, Dong-Woo y Jung-Ho [8] para determinar la cantidad de cal hidratada y de agua requerida para remover la totalidad del CO<sub>2</sub> presente en el biogás con una duración del filtro de 5 días, obteniendo una cantidad de 0.2 kg y 146.2 L respectivamente.

Se sugirió utilizar un barril plástico comercial con capacidad de almacenamiento de 220 L y tapadera hermética. El espacio sobrante cumple la función de una cámara almacenadora de biogás. La manguera de entrada se sumerge hasta el fondo, con agujeros en las paredes del extremo final, similar a una flauta, para lograr un mejor burbujeo de biogás en la solución y favorecer la adecuada remoción del CO<sub>2</sub>. La manguera de salida no se encuentra sumergida o próxima al agua con cal hidratada.

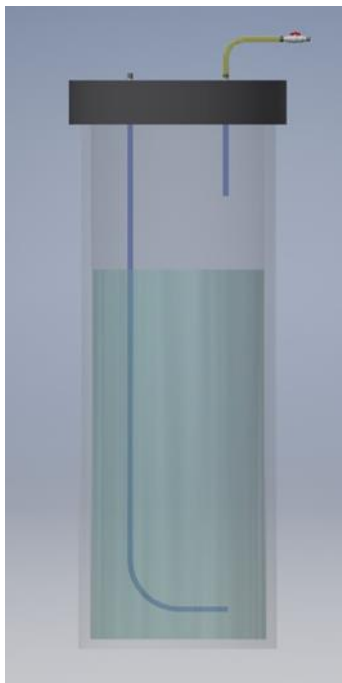


Fig. 4. Configuración del filtro de CO<sub>2</sub>.

2) *Trampa de condensado*: Evita o reduce el paso de condensados presentes en el biogás extraído del biodigestor, así como partículas de agua succionadas luego del filtro de CO<sub>2</sub>.

Se diseñó en forma de Y, como se muestra en la Fig. 5, con una inclinación de 45° para facilitar el deslizamiento de productos condensados hasta la tubería de purga, en la que se restringe el paso del líquido y pérdidas de biogás por medio de una válvula de bola.

La purga de los condensados acumulados en la trampa se recomienda hacerse diariamente, antes de poner en marcha el sistema de limpieza y compresión.



Fig. 5. Configuración recomendada para la trampa de condensados.

3) *Filtro de H<sub>2</sub>O*: Si bien existen filtros de humedad ya fabricados y comercializados para este fin, se decidió diseñar filtros con materiales de fácil disponibilidad, como se muestra en la Fig. 6.

El filtro consiste en un tubo de PVC de 0.0508 m de diámetro y 0.3 m de largo, con tapones roscados en cada extremo para facilitar la renovación del absorbente, utilizando aproximadamente 1.134 kg de gel de sílice para cada filtro.

Se consideró conveniente instalar dos de estos filtros, uno ubicado después de la trampa de condensado y otro ubicado después del filtro de H<sub>2</sub>S. Se recomienda extraer el gel de sílice cada 6 meses para regenerarlo por medio de un tratamiento térmico sencillo.

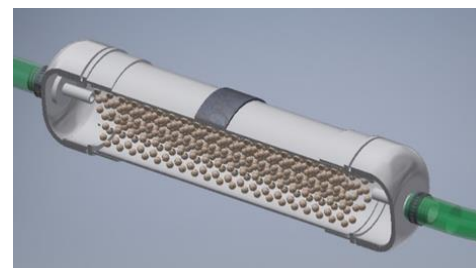


Fig. 6. Configuración recomendada para el filtro de humedad.

4) *Filtro de H<sub>2</sub>S*: Se diseñó un filtro que utiliza como medio filtrante pellets de óxido de hierro. Se consideró apropiado su uso porque con ellas es posible elaborar un filtro con igual rendimiento que un filtro de virutas pero con menor volumen.

Se diseñó en base a las relaciones de Castells [9] y su rendimiento según la experiencia del proveedor. El filtro permite reducir la concentración de H<sub>2</sub>S desde 925 ppmv hasta 100 ppmv, con una vida útil de 70 días. Luego de este tiempo se debe renovar el medio filtrante.

Se sugirió utilizar tubo PVC de 0.0762 m de diámetro y una altura de 0.45 m, orientado verticalmente como se muestra en la Fig. 7, que alberga los pellets de óxido de hierro, a través de las cuales se hace fluir el biogás desde la parte inferior hasta la parte superior.

La geometría vertical permite que el biogás permanezca el mayor tiempo posible dentro del filtro favoreciendo a la buena absorción de H<sub>2</sub>S. Se consideró apropiado que este depósito contenga un espacio a la entrada y a la salida que funcione como cámara de gas.

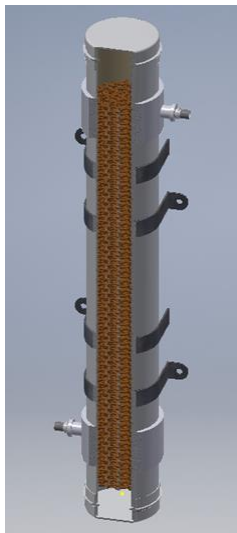


Fig. 7. Configuración recomendada para el filtro de H<sub>2</sub>S.

5) *Filtro de particulado fino*: Este es el último elemento del sistema de limpieza. Fue incluido debido a que con el tiempo, los pellets de óxido de hierro tienden a desgastarse y deshacerse. Para un sistema de compresión, estas pequeñas partículas pueden obstruir ciertos componentes y ocasionar daños mayores en el equipo. Por ello se decidió diseñar un filtro de particulado fino más convencional y económico que los filtros comercializados en el mercado, como el de la Fig. 8. Este consiste en un tubo de PVC de 0.0508 m de diámetro y 0.3 m de largo, con tapones roscados en cada extremo para facilitar la renovación del medio filtrante (algodón para el caso). Se recomienda renovar el algodón cada 70 días.

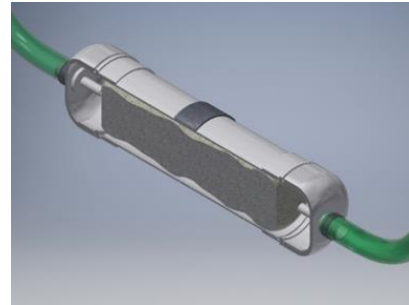


Fig. 8. Configuración recomendada para el filtro de particulado fino.

6) *Compresor y presostato*: Luego de que el biogás ha pasado por los distintos componentes del sistema de filtración, donde se remueven masa, se estima que el volumen disponible de biogás a comprimir disminuirá a un valor de 1.5 m<sup>3</sup>.

El compresor seleccionado fue un compresor de refrigeración R-600a, el cual trabaja con hidrocarburos. Estos compresores son ideales para adaptar a esta situación debido a que separa la parte mecánica de la eléctrica y esto previene incendios por chispa. Para este tipo de compresores, solo se encontró disponibilidad de potencias de 1/6 hp y 1/4 hp en El Salvador.

Debido a que 1/6 hp podría resultar ineficiente para los requerimientos específicos para el caso de la granja del INFRAMS, se opta por utilizar el compresor de 1/4 hp. El compresor se conecta a un presostato dual para comandar el paro del compresor en caso de sobrepresión y los elementos, mostrados en la Fig. 9, se encuentran comandados por un sistema eléctrico apropiado.

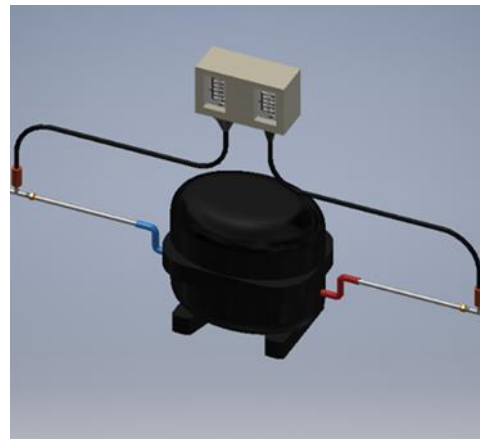


Fig. 9. Elementos del sistema de compresión.

7) *Sistema de almacenamiento*: El paso del biogás por el sistema de compresión permitirá su almacenamiento. Se diseñó un sistema de almacenamiento bajo el concepto de “trasiego”.

Esto quiere decir que se llenarán cilindros presurizados de 25 lb como los utilizados en el comercio del GLP, directamente de la salida del sistema



y estos servirán a la vez para el llenado de neumáticos y mochilas.

La idea del trasegado se justifica por los peligros que conlleva llenar los almacenadores volumétricos directamente del compresor, dada la posible variación de presión y las altas temperaturas a las que sale el biogás.

La Tabla 2 resume la masa de biometano que contendrá cada tipo de almacenador (cilindro, neumático y mochila) así como el volumen de agua que podría evaporar cada uno y el número de almacenadores diarios llenos.

Tabla 2. Proyecciones de almacenamiento

	Cilindro	Neumático	Mochila
Masa de biometano	0.15 kg	0.09 kg	0.67 kg
V <sub>H2O</sub> que evapora una unidad	2.55 L	1.54 L	10.97 L
Unidades llenas	8	14	2

El sistema completo tendría el aspecto mostrado en la Fig. 10.

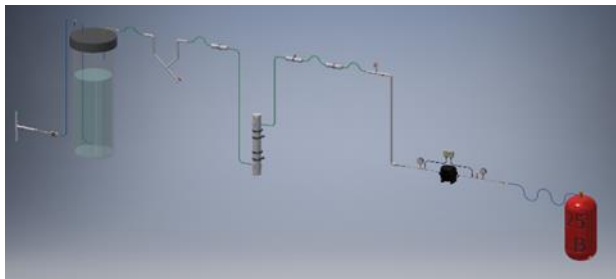


Fig. 10. Sistema completo de limpieza, compresión y almacenamiento en cilindro.

Para verificar si el soplador y el compresor tienen la capacidad de transportar el biogás a sus respectivos destinos, se realizó un análisis técnico del diseño final fundamentado en el análisis del sistema de tuberías con compresor para 4 horas de funcionamiento.

Los resultados concluyentes mostraron que para una eficiencia supuesta del 75% del soplador, se requieren 0.0038 hp, siendo esta potencia inferior a los 0.026 hp (20 W) de potencia nominal de la máquina seleccionada; por lo tanto, el elemento es idóneo para la función. En cuanto al compresor. Se obtuvo una potencia real mínima requerida de 0.321 hp, al comparar con la potencia nominal del compresor, 1/4 hp, y suponiendo una eficiencia de 90%, se obtiene que los valores son aproximados; por lo tanto, el compresor que se utilizará suplirá las necesidades pero en más tiempo del que se había previsto (5 horas aprox).

Por último se determinó la cantidad requerida de almacenadores para igualar al cilindro 25 lb de GLP. Los

resultados mostraron que la mochila de biogás requiere la menor cantidad, solo 16, seguida por los cilindros presurizados (68) y en último lugar los neumáticos (113). Además, en base a los días de producción, si se usaran mochilas de biogás, en 8 días se tendría la cantidad necesaria para igualar el rendimiento de un cilindro de GLP. Por lo tanto, la mochila de biogás resulta más atractiva desde un punto de vista técnico.

#### F. Análisis financiero

1) *Sin financiamiento:* Para el caso de la inversión sin financiamiento se obtuvo que la tecnología que presenta una TIR mayor fueron los neumáticos, seguido por los cilindros y en último lugar las mochilas de biogás. El menor período de retorno que se podría conseguir es de 7 años y 11 meses.

La Tabla 3 y Fig. 11 resumen los resultados obtenidos en el análisis económico sin financiamiento para aplicar cada tecnología.

Tabla 3. TIR y período de retorno para el análisis sin financiamiento

Tecnología	TIR	Período de retorno
Cilindros	6%	7 años y 11 meses
Neumáticos	7%	7 años y 7 meses
Mochilas	2%	9 años y 5 meses

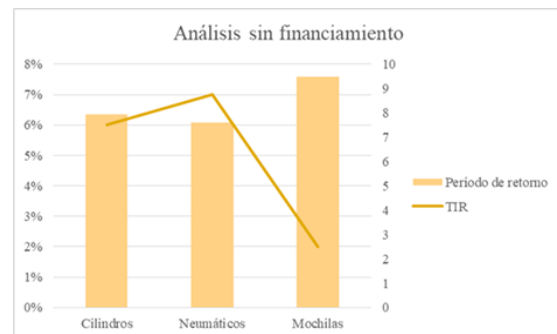


Fig. 11. TIR y período de retorno sin financiamiento.

2) *Con financiamiento:* Para el caso de los cilindros, al considerar la TIR y el período de retorno como parámetros de decisión, la mejor opción es el escenario 7 (50% cobertura para 3 años de préstamo), seguido del escenario 8 (50% de cobertura para 5 años de préstamo) y como tercera opción el escenario 4 (75% de cobertura para 3 años préstamo).

Sin embargo, para el caso específico de INFRAMS se consideró más apropiado una mayor cobertura de la inversión inicial, por lo que el escenario más conveniente es el escenario 4.

Los resultados para todos los escenarios del caso se resumen en la Tabla 4 y Fig. 12.

Tabla 4. TIR y período de retorno para el análisis con financiamiento de los cilindros

No. Escenario	TIR	Período de retorno
Escenario 1	4%	9 años y 3 meses
Escenario 2	3%	9 años y 7 meses
Escenario 3	0%	9 años y 11 meses
Escenario 4	5%	9 años y 1 mes
Escenario 5	4%	9 años y 4 meses
Escenario 6	3%	9 años y 7 meses
Escenario 7	6%	8 años y 11 meses
Escenario 8	5%	9 años y 1 mes
Escenario 9	5%	9 años y 3 meses

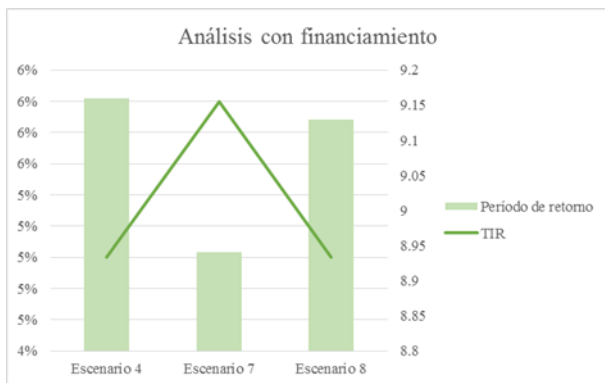


Fig. 12. TIR y período de retorno con financiamiento para los cilindros.

Estos mismos resultados se obtuvieron para el caso de los neumáticos de camión, donde la mejor opción es el escenario 7, seguido del escenario 8 y como tercera opción el escenario 4, siendo este último considerado el más conveniente.

Los resultados para todos los escenarios del caso se resumen en la Tabla 5 y Fig. 13.

Tabla 5. TIR y período de retorno para el análisis con financiamiento de los neumáticos de camión

No. Escenario	TIR	Período de retorno
Escenario 1	5%	9 años y 2 meses
Escenario 2	4%	9 años y 5 meses
Escenario 3	2%	9 años y 9 meses
Escenario 4	6%	9 años
Escenario 5	6%	9 años y 2 meses
Escenario 6	5%	9 años y 5 meses
Escenario 7	7%	8 años y 6 meses
Escenario 8	6%	8 años y 11 meses
Escenario 9	6%	9 años y 1 mes

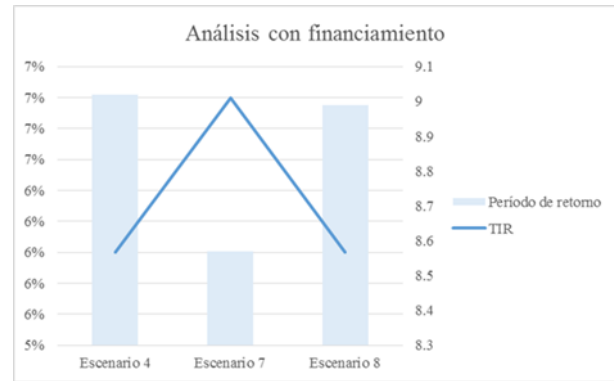


Fig. 13. TIR y período de retorno con financiamiento para los neumáticos de camión.

Para el caso de las mochilas se obtuvo que el único escenario en el que la TIR no es negativa es el escenario 7, con un valor del 0%. Para todos los demás el período de retorno de la inversión se encuentra fuera del tiempo de vida del proyecto.

Por lo que desde un punto de vista económico, las mochilas de biogás no resultan atractivas y esto es, como se dijo al inicio debido a que deben ser importadas y esto aumenta su costo.

Los resultados para todos los escenarios del caso se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. TIR y período de retorno para el análisis con financiamiento para las mochilas de biogás

No. Escenario	TIR	Período de retorno
Escenario 1	-2%	Más de 10 años
Escenario 2	-5%	Más de 10 años
Escenario 3	-10%	Más de 10 años
Escenario 4	-1%	Más de 10 años
Escenario 5	-3%	Más de 10 años
Escenario 6	-5%	Más de 10 años
Escenario 7	0%	9 años y 11 meses
Escenario 8	-1%	Más de 10 años
Escenario 9	-2%	Más de 10 años

Si se resumen los resultados obtenidos se tiene que en el caso sin financiamiento la mejor opción es el neumático de camión. Para el caso con financiamiento, la mejor opción de los cilindros (escenario 4) tiene una TIR del 5%, la mejor opción de los neumáticos (que también es el escenario 4) tiene una TIR del 6%, y las mochilas no resultan económicamente atractivas. Por ello, la mejor alternativa desde el punto de vista económico es el uso de neumáticos de camión y la inversión sin financiamiento.



#### IV. CONCLUSIONES

El diseño, el dimensionamiento, los materiales requeridos y el costo de la puesta en marcha del sistema de limpieza dependen rigurosamente del volumen y de las concentraciones de gases que contengan la mezcla de biogás a filtrar. Así pues, se comprueba mediante el análisis técnico y financiero que los filtros de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S cumplen con la aplicación en el Instituto, son accesibles, en cuanto a su operación y mantenimiento, y son asequibles.

Como producto del análisis económico realizado en este estudio se determinó que la alternativa más atractiva para invertir es el almacenamiento de biogás en neumáticos. Sin embargo, técnica y operacionalmente dicha alternativa es la menos favorable. La mochila de biogás, por otro lado, resultó ser la alternativa económicamente menos atractiva pero sus características técnicas y de operación la convierten en la opción más óptima a implementar en la realidad nacional y específicamente de la granja del INFRAMS. Por lo anterior se concluye que el almacenamiento en mochilas de biogás está justificado pues, a pesar de no ser la inversión más atractiva, es la que permitiría obtener un sistema más óptimo, eficiente y amigable al usuario, características básicas necesarias para la replicabilidad y perdurabilidad de implementación de un sistema.

Mediante este estudio se determinó que se necesitaría, en el caso del almacenamiento en cilindros, 64 de estos a las condiciones descritas para igualar el rendimiento de un solo cilindro de GLP. Esto evidencia que el uso del biogás no puede reemplazar por ahora la simplificación operacional del uso del GLP pero sí su aporte energético. Mediante el sistema de almacenamiento y transporte plasmado en este estudio, el biogás podría tener un alcance y cobertura mayor a la que actualmente posee, pues sería posible utilizarlo fuera del lugar donde es generado.

#### AGRADECIMIENTOS

Se le agradece al Ing. Sánchez por su asesoría para la realización de la presente investigación. Al Ing. Chávez e Ing. Hernández por su acompañamiento en este proceso.

Además, se le agradece a la Lic. Aquino y al Ing. Alvarado, del CNE, y al Ing. Hidalgo, de AQL El Salvador, por el apoyo técnico extendido para la ejecución del estudio.

Por último, se extiende el agradecimiento a los compañeros y colegas que colaboraron con sus conocimientos para la realización del proyecto.

#### REFERENCIAS

- [1] Salamanca, J. (2009). Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico. [Online]. Recuperado el 27 de Abril de 2019. Available: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/740/1/94246.pdf> (URL)
- [2] Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. (s.f.). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. [Online]. Recuperado el 27 de Abril de 2019. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/158829583.pdf> (URL)
- [3] German Biogas Association. (2017). Biogas to biomethane. [Online]. Available: <https://www.biogas-to-biomethane.com/Download/BTB.pdf> (URL)
- [4] Bustamante, J., Carranza, M., & Urquilla, K. (2013). Diseño y construcción de prototipo para la producción y el almacenamiento de biogás para su uso en cocinas domésticas y celdas de combustible. [Online]. Available: <http://ri.ues.edu.sv/838/1/10136485.pdf> (URL)
- [5] Ken, K., Don, A., JP, B., John, B., Brad, R., & Dara, S. (2005). Storage and Transportation of Biogas and Biomethane. [Online]. Available: <https://uc-ciee.org/downloads/Biomethan%20from%20Dairy%20Waste.pdf> (URL)
- [6] Linares, W., López, F., & Merino, F. (2017). Fundamentos teóricos y propuesta de un proceso para la práctica del envasado de biogás libre de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en El Salvador. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- [7] Durman. (2009). Geomembranas en Procesos de Digestión. Costa Rica.
- [8] Sang-Jun, H., Miran, Y., Dong-Woo, K., & Jung-Ho, W. (2011). Carbon Dioxide Capture Using Calcium Hydroxide Aqueous Solution as the Absorbent. [Online]. Recuperado el 13 de Junio de 2019. Available: [https://www.researchgate.net/publication/231272927\\_Carbon\\_Dioxide\\_Capture\\_Using\\_Calcium\\_Hydroxide\\_Aqueous\\_Solution\\_as\\_the\\_Absorbent](https://www.researchgate.net/publication/231272927_Carbon_Dioxide_Capture_Using_Calcium_Hydroxide_Aqueous_Solution_as_the_Absorbent) (URL)
- [9] Castells, X. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. [Online]. Recuperado el 26 de mayo de 2019. Available: <https://books.google.com.sv/books?id=KBTPxIi6IRsC&pg=PA656&lpg=PA656&dq=pellets+oxido+de+hierro+filtro+h2s&source=bl&ots=8sEIAj4RSR&sig=ACfU3U0o17AB1byV-nbIJMbe4JKOm8QiaQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewjoy8W9yrTiAhVBpFkKHYuBDUwQ6AEWA3oEACAcQAQ#v=onepage&q=pellets%20> (URL)