

## Viabilidad técnica y económica del uso de calentador comercial de agua a base de biogás en establos lecheros

Víctor Manuel Molina Morejón<sup>1</sup>  
Víctor Pedro Molina Romeo<sup>2</sup>  
José de Jesús Espinoza Arellano<sup>1§</sup>  
Juan Gabriel Contreras Martínez<sup>1</sup>  
Adriana López Villanueva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Contaduría y Administración-Universidad Autónoma de Coahuila-Unidad Torreón. Boulevard Revolución 153 oriente, Col. Centro, Torreón, Coahuila, México. CP. 27000. (vmolinaa2005@yahoo.com.mx; juan\_gabriel\_c@hotmail.com). <sup>2</sup>Facultad de Ciencias de la Administración-Universidad Autónoma de Coahuila-Unidad Saltillo. Carretera Saltillo-Piedras Negras km 5. Saltillo, Coahuila. CP. 25107. (vitigabyfrida@gmail.com). <sup>3</sup>Laboratorio de Biorremediación-Facultad de Ciencias Biológicas-Universidad Autónoma de Coahuila-Unidad Torreón. Carretera Torreón Matamoros km 7.5, Ejido el Águila, Torreón, Coahuila, México. CP. 27275. (adriana.carax@gmail.com).

§Autor para correspondencia: jesusespinoza.612@yahoo.com.mx.

### Resumen

El propósito de este trabajo fue analizar la viabilidad técnica y económica del uso de un calentador comercial que funciona con biogás para obtener el agua caliente necesaria en el saneamiento del área de ordeño o para calentar la leche que alimenta a los becerros en establos de La Comarca Lagunera, México. Es una alternativa económica y sostenible a la práctica generalizada de usar resistencias eléctricas o gas licuado de petróleo (GLP) que genera un gasto de aproximadamente \$300 000.00 pesos por año. Las características del calentador comercial adquirido se determinaron utilizando diversas ecuaciones de transferencia de calor. El análisis económico de la inversión se realizó a un plazo de cinco años utilizando indicadores que toman en cuenta el valor del dinero a través del tiempo como el valor presente neto, la tasa interna de retorno y la relación beneficio-coste. En las corridas experimentales se mantuvo la energía necesaria para el calentamiento del agua y una combustión eficiente. Se mostró la viabilidad técnica de la propuesta al no rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias ( $p > 0.05$ ) de las 45 muestras lo que implica una consistencia en los tiempos de calentamiento. El análisis financiero, en sus diferentes indicadores VAN, TIR y R B/C, mostró valores en rangos de aceptación del proyecto. Con esta solución se reduce la emisión de gases efecto invernadero y los costos de producción en las operaciones. La opción del empleo del biogás, es viable técnica y económicamente.

**Palabras clave:** análisis financiero, biodigestor, establos lecheros, estiércol, metano.

Recibido: enero de 2020

Aceptado: marzo de 2020

## Introducción

La Comarca Lagunera, con una producción anual de 2 448 millones de litros y una participación de 21% de la producción nacional es la principal cuenca lechera del país (SADER-Laguna, 2017; García *et al.*, 2019). El inventario de ganado bovino de leche en el año 2018 en la Comarca Lagunera fue de 490 876 cabezas (García *et al.*, 2019). En ella coexisten diferentes sistemas de producción de leche de vaca predominando el sistema intensivo altamente tecnificado con establos de más de 6 000 animales y una producción promedio por vaca en ordeño de más de 32 litros diarios (Espinoza *et al.*, 2018).

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2010), menciona que se utiliza para la actividad ganadera una superficie de 110 000 km<sup>2</sup> (11 x 10<sup>6</sup> ha) (SAGARPA, 2010) y esto corresponde al 5.6% del área total de México. A nivel regional se generan 7.5x10<sup>6</sup> t de excreta total en fresco, conteniendo 12.3% de materia seca (MS) lo que equivale a una producción de estiércol seco de 925 000 t anuales (Figueroa *et al.*, 2009). Una característica del metabolismo del bovino lechero es una baja eficiencia en el uso de nutrientes, principalmente de nitrógeno (N) (Figueroa *et al.*, 2015).

El estiércol animal puede ser un fertilizante eficaz y seguro si es tratado de manera adecuada. Si el tratamiento es inadecuado o si no se utiliza tratamiento alguno, hay un alto riesgo de contaminación con microorganismos patógenos, como *Campylobacter* spp., *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Clostridium botulinum*, *Giardia* spp., *Cryptosporidia* spp., *Microsporidia* spp. y *Fasciola* spp. (Acevedo *et al.*, 2017). Por otro lado, las excretas generan gases contaminantes como el dióxido de carbono CO<sub>2</sub> y el metano CH<sub>4</sub> gases que contribuyen al efecto invernadero (Barik *et al.*, 2013).

En la Comarca Lagunera se han implementado biodigestores en alrededor de 90 de los 251 establos especializados con el objetivo de aprovechar de manera sustentable los gases emanados del estiércol (López *et al.*, 2017) de ellos, alrededor de 10 emplean el biogás para producir electricidad. De los 80 biodigestores restantes unos 50 queman el metano a la atmósfera con antorchas especialmente diseñadas para esta función sin ningún aprovechamiento económico. Los biodigestores tipo laguna se diseñaron para capacidades que van de 20 000 a 30 000 m<sup>3</sup>; sin embargo, 90% no funcionan correctamente y su producción de metano está por debajo del nivel óptimo de 60% (López *et al.*, 2017).

Un estudio de Hernández *et al.* (2015) señala que en la Comarca Lagunera la producción potencial de metano es de 14 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, que queda reducida a 8.4 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> cuando se aplica un conservador 60% de eficiencia. La falta de información y estudios específicos por región dificulta la planeación y la gestión de las tecnologías renovables, sobre todo la del sistema de producción de biogás, cuyo proceso involucra complejos procesos biológicos.

A pesar que a nivel internacional, existen estudios que demuestran el potencial económico del aprovechamiento del estiércol, no se cuentan con estudios específicos en la Comarca Lagunera relacionados al manejo del sistema de producción de biogás para la generación eficiente de energía, por lo que es difícil precisar cuánta energía se pierde en los 50 biodigestores que queman el metano a la atmósfera sin ningún aprovechamiento. El estudio presentado en cuatro establos lecheros con una población conocida de 11 550 cabezas de ganado lechero indica que se desperdician alrededor de 65 000 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de biogás (Molina *et al.*, 2017).

El metano es un gas de efecto invernadero 21 veces más potente que el CO<sub>2</sub> (Varnero, 2011). Las emisiones de gases efecto invernadero cuando se usa la electricidad es igual a 0.454 toneladas de CO<sub>2</sub> (MWh)<sup>-1</sup> (SEMARNAT, 2015). Uno de los establos estudiados consume hasta 235 000 kWh año<sup>-1</sup> equivalente a 107 t de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. En el proceso de producción el elemento principal es el biodigestor, que al ser alimentado de materia prima, después de unos 30 a 90 días, la transforma en biogás, compuesto principalmente de gas metano, un potente gas de efecto invernadero, usado como combustible para generar calor o producir electricidad. El aprovechamiento del biogás representa un área de oportunidad en sectores económicos que pueden potencializar el desarrollo sostenible (Singh *et al.*, 2013).

### **Panorama del uso de la bioenergía en el mundo y en México**

La bioenergía obtenida de la biomasa es la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos. Los biocombustibles se obtienen a partir de la biomasa, con mayor o menor grado de procesamiento, dentro de ellos se distinguen los biocombustibles gaseosos como el biogás y el biometano, obtenidos de los residuos municipales y estiércol (García y Masera, 2016).

En 2015, el biogás utilizado para generar energía térmica a nivel mundial en calefacción industrial y residencial creció solo 3% en comparación del 2014. Sin embargo, la capacidad instalada de bioenergía creció 8%, principalmente en China, Japón, Alemania e Inglaterra. Al cierre de 2015, de 23.7% del total de energía renovable producida, la energía hidráulica ocupó 16.6%, seguida por la eólica con una participación de 3% y la bioenergía con 2%, la energía solar fotovoltaica y geotérmica, ocupan el 1.2 y 0.4% respectivamente.

A nivel mundial los principales productores de biogás son Estados Unidos de América, China y Alemania pues generan aproximadamente 69% de la producción mundial (40.8 millones de m<sup>3</sup>), y de forma complementaria se reporta que Europa contribuye con 45% de la producción mundial (26.2 millones de m<sup>3</sup>) (REN21, 2016). La potenciación del uso del biogás en la generación de calor es algo que ha experimentado el Reino Unido. Bayar (2017) afirma que en sus granjas y otros negocios de áreas rurales pueden encontrarse cada vez más plantas de digestión anaeróbica con sólo generación térmica como una ‘oportunidad más viable’ que las plantas combinadas de calor y electricidad (CHP) para los agricultores y otros usuarios de energía en el sitio.

En México, la producción de energía renovable representó 6.98% y la energía de biomasa tiene la mayor participación con 3.79% (Aleman *et al.*, 2014). El potencial de bioenergía de México se calculó por Hernández *et al.* (2015) mediante el tratamiento del estiércol por digestión anaeróbica, y se obtuvo aproximadamente 5910.35 TJ, pudiendo generar 410.41 GWh de electricidad y reducir las emisiones de metano en 2240.64 Gg CO<sub>2</sub> Eq.

### **Parámetros operacionales que afectan la producción de biogás**

El rendimiento final del biogás depende de la composición y biodegradabilidad de la alimentación orgánica. Las bacterias que descomponen la materia orgánica, las condiciones de crecimiento y la temperatura decide la velocidad de formación de biogás. La velocidad de digestión es afectada por la temperatura del proceso y debe ser mantenida en rangos mesofílicos con un diseño óptimo de digestor, naturaleza del sustrato, pH, tamaño de carga, tiempo de retención hidráulica y la proporción carbono:nitrógeno (C:N) todas afectan la producción de biogás (Hagos *et al.*, 2016).

Una buena producción de biogás se debe hallar en un pH entre 7 y 7.2 (Chawla *et al.*, 1986). Asimismo, para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente señala el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8 (Varnero, 2011). En Alvarado-Moreno (2016) se alerta sobre el efecto de la temperatura en la producción de biogás pues un incremento en la temperatura de 5 °C generó un aumento tanto en el pH como en los ácidos grasos volátiles y bajó la producción de metano en 18%. Se reporta como óptima para la producción de biogás, la proporción de C:N de 25-30:1 (Mital *et al.*, 1996).

Igualmente, la presencia de metales como el calcio, hierro, magnesio, molibdeno y níquel, incrementan la producción de biogás. Además, se reportó que los metanógenos requieren amoníaco para su velocidad específica de crecimiento y tiempo de replicación. La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaerobio, especialmente de la metanogénesis (Speece, 1996).

La importancia del tema de este trabajo está reflejada en el ‘programa estratégico tecnológico’ de la empresa estatal Petróleos Mexicanos (PEMEX, 2013) donde se plantea como reto tecnológico el ‘aprovechamiento del biogás’ y ‘como necesidad tecnológica evaluar el estado del arte, identificar, evaluar e implementar tecnologías para el aprovechamiento del biogás’. Asimismo, el antecedente de este trabajo tiene su origen en una demanda de investigación del programa de estímulos a la innovación (PEI) sobre la gestión eficiente de la energía en los establos de La Comarca Lagunera (CONACYT, 2013).

Posteriormente Molina *et al.* (2017) Realizaron una investigación experimental a nivel de laboratorio con un pequeño calentador que tuvo como objetivo demostrar la viabilidad técnica del empleo del biogás como fuente de energía térmica para el calentamiento del agua en el cual se concluyó la necesidad de usar un calentador de mayor capacidad para suministrar el volumen de agua caliente necesario que satisficiera la demanda del establo para fines de saneamiento y preparación de la leche para becerros.

## Materiales y métodos

Etapa 1: como el biogás contiene solo 41% del valor calórico del gas licuado de petróleo GLP, las características del calentador comercial que se adquirió se determinaron previamente utilizando ecuaciones de transferencia de calor para determinar si podría satisfacer la demanda de agua caliente del establo. Los datos de entrada para iniciar los cálculos se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Datos de entrada para el cálculo de la carga térmica y el flujo de biogás.**

Datos conocidos	Siglas y unidades	valores
Temperatura del agua, a la entrada del calentador	( $T_{ent}$ ) °C	18
Temperatura del agua demandada, a la salida del calentador	( $T_{sal}$ ) °C	70
Valor calórico superior del biogás (VCS)	(VCS) kJ (m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	20 880
Flujo inicial de biogás	(Q) m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	1.5
Alto del calentador	(L) m	1.7
Diámetro interno del calentador	(D) m	0.54
Área de la base del calentador	(A) m <sup>2</sup>	0.229

## Cálculo de la carga térmica necesaria para calentamiento de agua en un calentador utilizando Biogás

Datos experimentales: a) temperatura del agua zona de entrada del calentador ( $T_{ent}$ ): 18°C; b) temperatura del agua zona de la salida ( $T_{sal}$ ): 70°C; c) valor calórico superior del biogás (VCS) 20 880 kJ (m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>; d) flujo de biogás inicial 1.5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>; e) flujo de agua a calentar (Q): 1.02 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>; y f) alto (L): 1.7 m, g) diámetro interno: (D) 0.54 m. Material: acero inoxidable.

Consideraciones para el cálculo: el calentador se comporta como un tubo cilíndrico vertical. La temperatura después de 27 min. Se homogeniza y es constante la superficie del calentador permitiendo usar parámetros medios del agua a calentar. No hay variaciones en las áreas en las secciones de entrada y salida y al ser la capacidad de almacenaje de 0.2 m<sup>3</sup> el flujo de reposición se considera pequeño en comparación con el volumen del tanque dando condiciones de flujo casi estanco. Existen condiciones estacionarias de operación. Los cálculos realizados a partir de estos datos se presentan en el Cuadro 2.

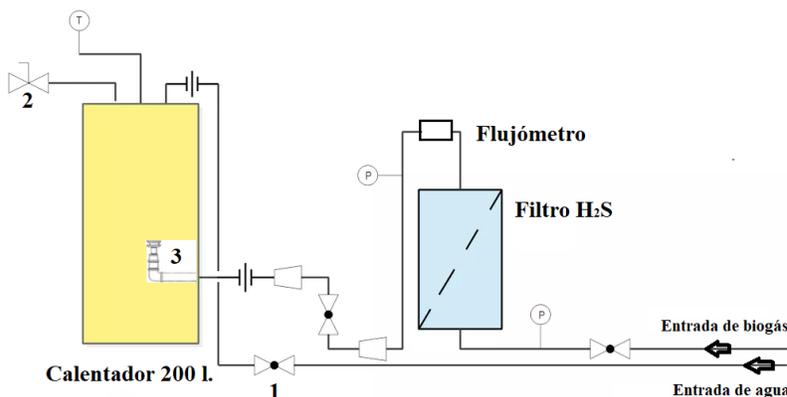
**Cuadro 2. Datos de entrada para el cálculo de la carga térmica y el flujo de biogás.**

Denominación del cálculo	Ecuación básica	Resultado obtenido
Cálculo de la transferencia de calor por radiación	$q_{Rad} = F_{12} * A_1 * \sigma * (\Delta T_{12}) + F_{13} * A_1 * \sigma * (\Delta T_{13})$	$q_{Rad} = 15194.19 \text{ kJ h}^{-1}$
Cálculo de la velocidad del agua dentro del calentador	$V = \frac{Q}{A}$	$V = 0.00124 \text{ m s}^{-1}$
Cálculo del número de Reynolds	$Re_D = \frac{V * \rho * D}{\mu}$	$Re_D = 1209.22$
Correlación de Sieder y Tate para flujo laminar	$Nu_D = \frac{\bar{h} * D}{k} = 1.86 * \left( \frac{Re_D * Pr}{\frac{L}{D}} \right)^{\frac{1}{3}} * \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	$Nu_D = 23.48$
Determinación del coeficiente de transferencia del calor a la temperatura media del fluido	$Nu_D = \frac{\bar{h} * D}{k}$	$\bar{h} = 27.7 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$
Cálculo del calor por convección en el calentador	$q_{conv} = \bar{h} * P * L * \Delta T_{ml}$	$q_{conv} = 13287.24 \text{ kJ h}^{-1}$
Pérdida de calor por conducción a través de las paredes	$q_{cond} = \frac{\Delta T_{ml}}{R_1 + R_2 + R_3}$	$q_{cond} = 1548 \text{ kJ h}^{-1}$
R <sub>1</sub> Resistencia en la pared interior	$R_1 = \frac{LN \left( \frac{r}{r_1} \right)}{2 * \pi * k * L}$	$R_1 = 0.917865 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{kW}$

Denominación del cálculo	Ecuación básica	Resultado obtenido
R <sub>2</sub> Resistencia en la pared metálica del tanque	$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$	R <sub>2</sub> = 0.319862 °C/kW
R <sub>3</sub> Resistencia en la insulación exterior	$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$	R <sub>3</sub> = 106.15 °C/kW
Carga térmica por convección y conducción	$q_{\text{total Con-Cond}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{cond}}$	q <sub>total Con-Cond</sub> = 14835.6 kJ h <sup>-1</sup>
Cálculo del calor total necesario	$q_{\text{total}} = q_{\text{Rad}} + q_{\text{total Con-Cond}}$	q <sub>total</sub> = 30037 kJ h <sup>-1</sup>
Cálculo del flujo de biogás necesario	$q_{\text{total}} = \text{VCS} \cdot Q_{\text{bio}}$	Q <sub>bio</sub> = 1.44 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>

Primeramente, se calculó el calor por radiación y convección calculando el número de Reynolds y el número de Nusselt. Para el cálculo del calor por convección se calculó la posible pérdida de calor por conducción a través de las paredes: interior, R<sub>1</sub>; pared metálica del tanque, R<sub>2</sub> y resistencia a la insulación, R<sub>3</sub>. Luego se obtuvo la carga térmica por convección y conducción. El valor del calor total necesario (q<sub>total</sub>) fue de: 30037 kJ h<sup>-1</sup> y el flujo de biogás (Q<sub>bio</sub>) necesario alcanzó un valor de 1.44 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Etapa 2: compra, instalación y modificación al calentador para que pudiera funcionar con biogás. A partir de los resultados de la etapa 1 se adquirió un calentador comercial de 1 800 L h<sup>-1</sup> capaz de satisfacer la demanda del establo de 1 000 L de agua caliente tres veces al día: luego de cada ordeña, más las siete horas que dura la preparación de la leche a los becerros, entre las 4 am y las 11 am. De este calentador original sólo se empleó el chasis y el tanque de depósito de agua. El esquema simplificado del trabajo experimental realizado se muestra en la Figura 1 donde se aprecian de derecha a izquierda dos tuberías, una conduce biogás vivo desde el biodigestor, el cual es filtrado para reducir el contenido de H<sub>2</sub>S antes de entrar al calentador.



**Figura 1. Esquema simplificado del Banco de ensayo con calentador de 200 litros.**

La otra tubería conduce agua de abasto local a la temperatura ambiente. En total se realizaron 15 corridas, con una repetibilidad de 3 muestras por corrida, en total 45 muestras experimentales durante los meses de noviembre de 2016 y enero de 2017 generalmente entre las 7:30 y 13:30 h.

Se planteó la hipótesis nula  $H_0$  que formula la no existencia de diferencias significativas entre las medias de las diferentes corridas experimentales teniendo en cuenta los tiempos de calentamiento en función de la temperatura que alcanza el agua. El análisis estadístico se realizó con base al análisis Anova utilizando la prueba de 'F' de Fisher para ver si al menos alguna media era diferente; y si fuese el caso, aplicar la prueba de Tukey para hacer la comparación múltiple de medias (Lind *et al.*, 2004; Levin y Rubin, 2010).

Etapa 3: se diseñó un nuevo quemador adaptado para quemar biogás con capacidad de poder regular la relación aire combustible para lograr una mejor combustión.

Etapa 4: instrumentación del banco de ensayo: se empleó un detector de gases múltiples,  $CH_4/O_2/CO/H_2S$ . Marca Draeger-Grainger para obtener valores del biogás. La temperatura del agua se midió con termómetros instalados en el calentador. El flujo de biogás fue medido por un flujómetro rotatorio. La presión del biogás a la entrada del calentador se midió con un manómetro diferencial. La evaluación financiera del proyecto fue realizada; a través, de los indicadores financieros clásicos en la evaluación de proyectos valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio/costo (Baca, 2013; FAO, 2017). Estos indicadores están basados en el análisis del valor del dinero a través del tiempo dado que es un proyecto a cinco años.

## Resultados y discusión

Para ilustrar de manera simplificada la relación tiempo de calentamiento en minutos contra temperatura del agua en °C, en la Figura 2 se presenta solamente el resultado de seis muestras experimentales (series 1 al 6), donde se observa que el tiempo promedio de duración del experimento es de alrededor de 230 min, este tiempo se distribuye de la siguiente forma: los primeros 170 min se emplean para que la temperatura del agua dentro del calentador alcance alrededor de 90 °C. Lograda esta temperatura, se abre la válvula de paso No. 2, comienza a fluir agua caliente al exterior del calentador y a la vez entra igual cantidad de agua fría a su interior.

Como en todo calentador de paso, la temperatura del agua caliente comienza a descender por la entrada de agua fría y se estabiliza en un valor de 70 °C, señal de que el volumen de agua contenido en el tanque de 200 L se ha homogenizado y se mantiene en equilibrio.

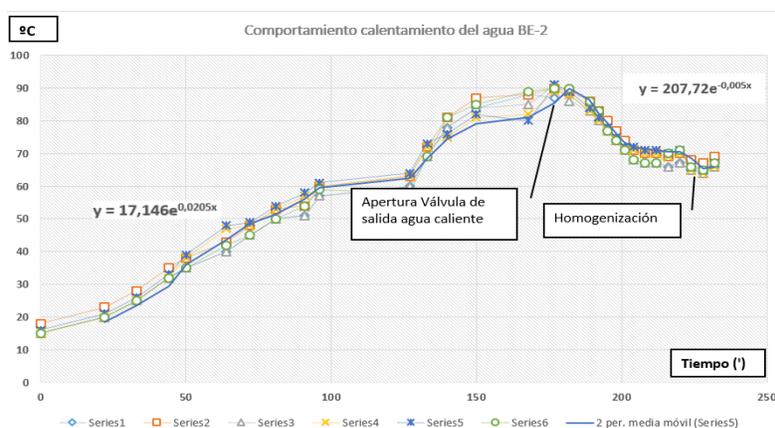
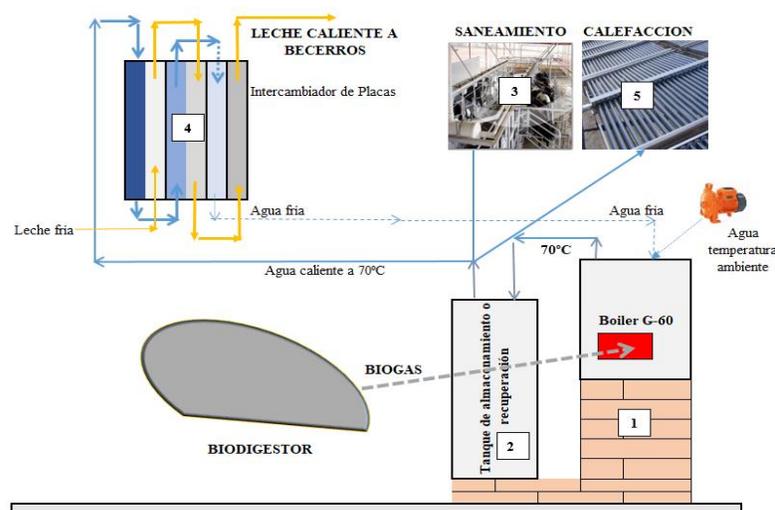


Figura 2. Resultado de dos corridas experimentales con seis muestras: temperatura vs tiempo.

A todas las muestras se le midieron valores de temperatura en 30 momentos (con intervalos de siete minutos), desde el comienzo del experimento hasta la homogenización. Al comparar en las muestras analizadas la relación tiempo de calentamiento en minutos vs la temperatura que alcanza el agua en °C, los resultados del Anova indican que no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias ( $p > 0.05$ ) concluyendo que los tiempos de calentamiento son iguales. También se modeló el comportamiento de la temperatura (y) contra el tiempo (x) obteniendo la ecuación  $y = 17.146e^{0.0205x}$  (de 0 a 170 min) y el comportamiento de la temperatura de descenso hasta su estabilización expresada como  $y = 207.72e^{-0.005x}$  (de 170 a 210 min).

Los valores promedio alcanzados, tanto del flujo de biogás como del calor resultante fueron suficientes para lograr el calentamiento del agua lo que unido al no rechazo de la hipótesis de igualdad de medias muestra la viabilidad técnica de usar el biogás como fuente de energía para obtener el agua caliente necesaria en el establo.

El esquema final del sistema de calentamiento se presenta en la Figura 3 en donde se observó que cuando el agua en el calentador (1) alcanza su temperatura de homogenización, toda ella se va almacenando en un tanque de almacenamiento o recuperación (2) capaz de mantener esta temperatura más allá de las 24 h. El uso de esta agua es principalmente para saneamiento (3) y como elemento de preparación de la leche a los becerros, empleando un intercambiador de placas (4) y como medio de calefacción (5) en época de bajas temperaturas.



**Figura 3. Esquema final del empleo de agua calentada con biogás.**

Como parte de los resultados se hacen observaciones, que pueden tener algunas implicaciones prácticas para posibles usuarios de esta tecnología: la opción del empleo del filtro para eliminar el  $H_2S$  fue finalmente desechada porque tal como observa ADBA (2015) no se requiere tratamiento para eliminarlo si solamente es quemado. Es probable que en otros trabajos, el punto de inflexión de la homogenización no se alcance en 210 min porque, por ejemplo, el valor promedio del metano sea otro. Sin embargo, estos resultados son puntos de referencia y permiten ser comparados con experimentos futuros.

Molina *et al.* (2017) mencionan que el establo donde se realizó esta investigación tiene una población de 4 600 cabezas de ganado lechero y una producción estimada de metano de 25 500 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, equivalente a 70 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> (2.9 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). El calentador comercial necesitó 3.5 h para alcanzar los 70° C de agua demandada por el establo y consumió en ese tiempo alrededor de 11 m<sup>3</sup> de biogás. Por ello, el calentador requirió 11 h de trabajo para cubrir los 1 000 L de agua tres veces al día y consumió alrededor de 32 m<sup>3</sup> en sus tres turnos de trabajo. Durante las siete horas que dura la preparación de la leche a los becerros se consumen 20 m<sup>3</sup> de biogás. En total todo el proceso consume 74% de la producción estimada diaria.

La biomasa sólida representa la mayor proporción de biomasa utilizada a nivel mundial para la generación de calor con 77%, los residuos sólidos urbanos (MSW) representan 18%, el biogás un 4% y los biocombustibles 1%. El biogás participó 20% de la generación de electricidad, los MSW 8% y los biocombustibles en 1% electricidad. E biocombustible líquido representa la mayor fuente en el sector del transporte (REN21).

En la Figura 4 (izquierda) se muestra el calentador de 360 L h<sup>-1</sup> (E<sub>1</sub>) del trabajo mencionado en (Molina *et al.*, 2017) y a la derecha, el calentador de 1 800 L h<sup>-1</sup> de este estudio (E<sub>2</sub>). Los resultados de este trabajo fueron reconocidos en la ficha pública del proyecto 231389 (CONACYT, 2017).



**Figura 4.** Calentadores empleados en los trabajos E<sub>1</sub> (izquierda) y E<sub>2</sub> (derecha).

### **Análisis financiero**

El análisis financiero del proyecto E<sub>2</sub> se basó en un horizonte de cinco años con una inversión inicial de \$400 000.00 y gastos operativos anuales de \$18 000.00 más \$47 450.00 anuales por uso de biogás para un total de \$65 450.00 anuales. Según García y Masera (2016) se gastan en biogás \$USD 6.48 diarios (que equivalen a \$130.00 pesos mexicanos diarios multiplicado por 365 días nos dan los \$47 450.00 anuales que se están agregando) (Cuadro 3). La inversión inicial incluyó la adquisición del calentador de agua, el tanque de almacenamiento, tuberías y accesorios, instrumentación y control, montaje, el diseño e instalación del nuevo quemador adaptado al biogás y el tendido de red de agua caliente.

Los gastos de operación incluyeron la revisión y mantenimiento anual del equipo. Los ingresos son los ahorros que la empresa realiza por los gastos de energía eléctrica para el calentamiento del agua. Al ser un proyecto a varios años se tienen que actualizar los flujos de ingresos y egresos para que

sean comparables en el tiempo. La tasa de actualización varía según el tipo de proyecto, algunas dependencias públicas establecen las tasas a las cuales se deben actualizar los costos e ingresos de los proyectos que les solicitan fondos.

**Cuadro 3. Costos, ingresos y flujo de fondos del proyecto de calentamiento de agua con la utilización de biogás en establos lecheros de la Comarca Lagunera.**

Años del proyecto	Costos (\$)	Ingresos (%)	Flujo corriente de fondos (\$)	Factor de actualización (25%)	Costos actualizados (\$)	Ingresos actualizados (\$)	Flujo de fondos actualizado (\$)
0	400 000	-	-400 000	1	400 000	-	-400 000
1	65 450	281 476	216 026	0.8	52 360	225 181	172 821
2	65 450	281 476	216 026	0.64	41 888	180 145	138 257
3	65 450	281 476	216 026	0.51	33 510	144 116	110 605
4	65 450	281 476	216 026	0.41	26 808	115 293	88 484
5	65 450	281 476	216 026	0.33	21 447	92 234	70 787
Sumas	727 250	1 407 380	680 130		576 013	756 968	180 954

En nuestro caso utilizamos una tasa de actualización de 25% la cual pareciera muy alta; sin embargo, es la tasa que maneja la empresa que provee este tipo de equipamiento a los establos interesados en su instalación. Se trató que fuera lo más real posible. Al ser una tasa alta se tiene la ventaja de que somete a mayor presión la viabilidad del proyecto, de tal manera que es más robusto en caso de que los costos fueran mayores a lo planeado o los ingresos menores a lo estimado.

Los indicadores financieros utilizados fueron el VAN, la TIR y la relación B/C. Los criterios para aceptar un proyecto como viable es que el  $VAN > 0$ , la  $TIR >$  que el costo de dinero y la relación  $B/C > 1$  (Baca, 2013; FAO, 2017). Los tres indicadores (Cuadro 4) resultaron en los rangos de aceptación del proyecto por lo que se concluye que la inversión en calentadores de agua utilizando como combustible el biogás producido por el propio establo lechero es viable económicamente.

**Cuadro 4. Indicadores financieros del proyecto de calentamiento de agua con la utilización de biogás en establos lecheros de la Comarca Lagunera.**

Indicador financiero	Valor del indicador	Decisión sobre el proyecto
VAN	180 954	Se acepta
TIR	46%	Se acepta
B/C	1.31	Se acepta

También se calculó el período de recuperación de la inversión (payback). De acuerdo con los datos del flujo de fondos actualizados (Cuadro 2) al finalizar el segundo año se han recuperado \$311 078.00 por lo que se requieren 0.8 años adicionales para un total de 2.8 años para recuperar la inversión inicial. Los costos de inversión o de capital de las energías renovables presentan variaciones importantes no solo en un contexto global sino también entre países de una misma región.

## Conclusiones

La propuesta de calentamiento de agua con un calentador comercial, que utiliza metano generado por la digestión anaeróbica del estiércol producido en el establo, mostró viabilidad técnica al mostrar consistencia en los tiempos de calentamiento de las 45 muestras estudiadas. El análisis económico, con sus diferentes indicadores, VAN, TIR y R B/C, observó valores en rangos de aceptación del proyecto. Por lo anterior, se concluye que el calentamiento del agua en los establos lecheros para fines de sanitización y calentamiento de leche para becerros, con un calentador comercial, es viable técnica y económicamente.

A nivel de gerentes de establos lecheros en la Comarca Lagunera no existe un concepto claro de lo que es la gestión eficiente de energía, no existe una cultura de evaluar la importancia de ser eficiente en el uso de este recurso. Será necesario difundir este tipo de tecnologías; a través, de diferentes medios, como las estaciones de demostración con los principales ganaderos líderes donde se aprecie la bondad del sistema y se pueda aumentar su utilización.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al MVZ José Antonio Romero Martínez del Establo 'El Coronel' por las facilidades brindadas para el trabajo de campo durante la realización de este estudio.

## Literatura citada

- Acevedo, I.; Leos, J. A.; Figueroa, U. y Romo, J. L. 2017. Política ambiental: uso y manejo del estiércol en la Comarca Lagunera. *Acta Universitaria*. 27(4):3-12. <https://dx.doi.org/10.15174/au.2017.1270>.
- ADBA. 2015. Anaerobic digestion & biogas association. Producing and using biogas. Chapter 5. In *The practical guide to AD*. London, UK. 59-80 pp. <http://adbioresources.org/search/ejyzyxn1bhrfcgfnzsi6innlyxjjacisimtlexdvcmrzijoiq2hhchrlcia1libqcm9kdwnpbmcgyw5k ihvzaw5nigjpb2dhcy4ifq>.
- Alemán, G. S.; Casiano, V.; Cárdenas, D. R.; Díaz, N.; Scarlat, J.; Mahlkencht, J. F.; Dallemand, A y Parra, R. 2014. Renewable energy research progress in Mexico: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 32:140-153.
- Alvarado-Moreno, J. 2016. Efecto de la temperatura en la producción de biogás en un bioreactor tipo batch a través de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. *ENGI Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Buenaventura, Colombia* 3(1):16-19.
- Baca, U. G. 2013. Evaluación de proyectos. Séptima edición, McGraw Hill. México. 387 p.
- Barik, D.; Sah, S. and Murugan, S. 2013. Biogas Production and Storage for Fueling Internal Combustion Engines. *Inter. J. Emerging Technol. Adv. Eng. an ISO Certified Int. J.* 3(3):193-202.
- Bayar, T. 2017. Heat-only biogas plants could edge out UK CHP, firm says. <http://www.pennenergy.com/articles/cospp/2017/05/heat-only-biogas-plants-could-edge-out-uk-chp-firm-says.html>.
- Chawla, O. 1986. Advances in biogas technology, Indian Council of Agricultural Research, New Delhi. <https://www.worldcat.org/title/advances-in-biogas-technology/oclc/692066363>.

- CONACYT. 2013. Eficiencia energética de bombas de pozo profundo y ordeños mecánicos en establos de Comarca Lagunera. <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/sni/fichas/2013/5617-196007-ficha-publica/file>. (10 de junio de 2019) ó 196007-ficha-publica/file.
- CONACYT. 2017. Gestión eficiente del biogás para generar energía térmica. <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/transparencia/transparencia-focalizada/fichas-publicas/fichas-publicas-2016/15761-ficha-publica-231389/file>.
- Espinoza-Arellano, J. J.; Carrillo, A.; Molina, V.; Torres, D. y Fabela, A. 2018. Características técnicas y socioeconómicas de establos del sistema de producción intensivo de leche de vaca de la Comarca Lagunera. *Revista Agrofaz*. 18(1):101-109.
- FAO. 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Guía para la formulación de proyectos de inversión del sector agropecuario Ministerio de Desarrollo Agropecuario. Ciudad de Panamá. <http://www.fao.org/3/I8097ES/i8097es.pdf>.
- Figuerola, U.; Núñez, G.; Delgado, J. A.; Cueto J. A. y Flores, J. P. 2009. Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la Comarca Lagunera. *In: Orona C. I.; Salazar, S. M. E. y Fortis H. (Eds.). Agricultura orgánica*. 2ª (Ed.). FAZUJED. SMCS. Gómez Palacio, Durango. 128-151 pp.
- Figuerola, U.; Núñez, G.; Reta D. y Flores, H. 2015. Balance regional de Nitrógeno en el sistema de producción de leche-forraje de la Comarca Lagunera, México. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 6(4):377-392.
- García, C. A. y Masera, O. 2016. Estado del arte de la bioenergía en México. Publicación de la red temática de bioenergía (RBT) del CONACYT. <http://rtbioenergia.org.mx/wp-content/uploads/2016/12/Divulgacion-Estado-del-arte-de-la-bioenerg%C3%ADa-en-M%C3%A9xico.pdf>.
- García, G. O.; Figuerola, U.; Cueto, J. A.; Núñez, G.; Gallegos, M. y López, J. D. 2019. Disponibilidad de nitrógeno usando dos tipos de estiércol de bovino lechero en cultivos de maíz forrajero y triticale. *Rev. Nova Scientia*. 11(1):124-141 [doi.org/10.21640/ns.v11i1.1709](https://doi.org/10.21640/ns.v11i1.1709).
- Hagos, K.; Zong, J.; Li, D.; Liu, C. and Lu, X. 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.
- Hernández De Lira, I.; Huber, D.; Espinosa, T. and Balagurusamy, N. 2015. Methane emission and bioenergy potential from livestock manures in México. *J. Renewable and Sustainable Energy*. 7(5):1-10. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/283851321>.
- Levin, R. y Rubin, D. 2010. Estadística para administración y economía. Ed. Pearson. 7ª (Ed.). revisada. México, DF. 799 p.
- Lind, D.; Marchal, W. y Mason, R. 2004. Estadística para administración y economía. Ed. Alfaomega. 11 (Ed.). México, DF. 830 p.
- López, A.; Hernández de Lira, I. y Molina, V. 2017. Propuesta de proceso de gestión eficiente del sistema de producción de biogás para la cogeneración de energía en establos lecheros de la Comarca Lagunera. *CienciAcierta*. (51):1-17.
- Mital, K. 1996. Biogas systems: principles and applications, new age international (P). Limited Publishers, New Delhi. 412 p.
- Molina, V.; Molina, V. P.; García, F. and Gutiérrez, O. 2017. Efficient biogas management to generate thermal energy. *Inter. J. Eng. Innov. Res.* 6(5):235-239.

- PEMEX. 2013. Petróleos Mexicanos. Programa estratégico tecnológico 2013-2027, Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios. <http://www.pemex.com/acerca/informes-publicaciones/Paginas/tecnologico-estrategico.aspx>.
- REN21. 2016. Renewable energy policy network for the 21<sup>st</sup> Century. Renewables 2016 Global Status Report. Paris, France. 272 p. <http://agricultura.gencat.cat/web/.content/departament/de02-estadistiques-observatoris/27-butlletins/02-butlletins-nd/documents-nd/fitxers-estatics-nd/2016/0179-2016-ERenovbles-Energia-renovable-mon.pdf>.
- SADER-Laguna. 2017. Estadísticas del sector agropecuario y forestal de la Comarca Lagunera. Delegación de SAGARPA en la Comarca Lagunera. Subdelegación de Planeación. Cd. Lerdo, Durango.
- SAGARPA. 2010. La producción de carnes en México. Claridades Agropecuarias. 207:19-33.
- SEMARNAT. 2015. AViso para el reporte del registro nacional de emisiones. [http://www.geimexico.org/image/2015/aviso\\_factor\\_de\\_emision\\_electrico%202014%20Semarnat.pdf](http://www.geimexico.org/image/2015/aviso_factor_de_emision_electrico%202014%20Semarnat.pdf).
- Singh, A.; Pant, D. and Olsen, K. 2013. Importance of life cycle assessment of renewable energy sources. *In*: Singh, A.; Pant, D. O. (Eds.). Life cycle assessment of renewable energy sources. Green Energy Technol. 13-37 pp. Doi: 10.1007/978-1-4471-5364-1.
- Speece, R. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Archae Press, Nashville, Tennessee, USA. <https://www.worldcat.org/title/anaerobic-biotechnology-for-industrial-wastewaters/oclc/35335903>. 394 p.
- Varnero, M. 2011. Manual de biogás. Proyecto CHI/00/G32. Chile: remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.