

Producción eficiente de biogás mediante calentamiento del sustrato con energía solar térmica de baja temperatura

Segundo José Guasumba-Codena^{1a}

Paúl Michael Tafur-Escanta^{1b}

Luis Tipanluisa²

Edwin Ocaña³

José Emilio Pérez-Rosales^{1c}

^{1a}Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"

^{1b}Grupo de Investigación en Energías Renovables

^{1c}Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

²Laboratorio de Mecánica de Materiales

CP 171103

ECUADOR

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo "ESPOCH"

Escuela de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, 060155

ECUADOR

³Universidad Tecnológica Indoamérica

Facultad de Ingenierías de la Información y Comunicación

Carrera de Ingeniería Industrial, 170103

ECUADOR

correos electrónicos (email): sjguasumb@espe.edu.ec

pmtafur@espe.edu.ec, luis.tipanluisa@epoch.edu.ec

edwin.ocana@uti.edu.ec, jeperez@espe.edu.ec

Recibido 02-07-2018, aceptado 09-10-2018.

Resumen

Este proyecto de investigación tiene la finalidad de mejorar la producción de biogás mediante el calentamiento del sustrato (lodo), con energía solar térmica de baja temperatura inferior a los 100°C. Para calentar una masa biodegradable de 693 kg, compuesta por estiércol de vacuno, *pennisetum clandestinum*, urea y agua, se utilizaron 6 colectores planos (CSP) con potencia térmica total de 6000 W, orientados al sur y ángulo de inclinación de 20° en una región de latitud -0.3°. El agua caliente sanitaria (ACS) ingresa a la región anular del digestor a una temperatura promedio de 35°C logrando mantener la fermentación anaeróbica durante el día y la noche a una temperatura cercana a los 26°C, dentro del rango mesofílico. El equipo utilizado para el ensayo es un digestor de cilindros concéntricos construido en acero al

carbono. El sustrato y el gasómetro se localizan en la parte interna del recipiente y el agua caliente circula por la pared anular del tanque que se encuentra aislado por el exterior para reducir las pérdidas térmicas al ambiente. Por otra parte, para determinar de manera indirecta la producción eficiente de biogás, se utiliza una variable física: la presión interna del recipiente que contiene el gas generado. En el transcurso de 30 días de retención hidráulica (TRH), se logra un incremento en la presión interna de 4.8 PSI/día, en forma lineal. Esta nueva alternativa para producir biogás puede ser útil en los sectores agrícolas y ganaderos para la obtención de biocombustible.

Palabras clave: biogás, sustrato, calefacción solar, fermentación anaeróbica, espacio anular.

Abstract

(Efficient Production of Biogas through Heating the Substrate with Low Temperature Solar Thermal Energy)

This research project aims to improve the production of biogas by heating the substrate (mud), with solar energy from low temperature lower than 100°C. To heat a biodegradable mass of 693 kg composed of cow dung, *pennisetum clandestinum*, urea and water, 6 are used. Flat collectors (CSP) with 6000 W of thermal power, oriented with 20° of inclination in south direction in a region of latitude -0.3°. Domestic hot water (DHW) enters the annular region of the digester at an average temperature of 35°C achieving maintain an aerobic fermentation during the day and night at a temperature close to 26°C, within the mesophilic range. The equipment used for the test is a digester of concentric cylinders built in carbon steel, where the substrate and the gasometer are located on the inside and hot water circulates through the annular walls of the tank which is isolated with rock wool to reduce losses to the environment. On the other hand, to determine indirectly the efficient production of biogas, a physical variable is used: the internal pressure of the container that contains the gas generated. In the course of 30 days of hydraulic retention (TRH), an increase in the internal pressure of 4.8 PSI/day is achieved, in a linear way. This new alternative to produce biogas can be useful in the agricultural sectors and live stock farmers to obtain biofuels.

Index terms: biogas, substrate, solar heating, anaerobic fermentation, annular space.

1. Introducción

El sol es el origen y sostén de la vida sobre el planeta. Los vegetales mediante la fotosíntesis captan la energía solar y lo transforman en energía química elaborando moléculas orgánicas para lo cual necesitan absorber CO_2 atmosférico [1]. La eficiencia de la fotosíntesis es baja, tiene un valor menor al 5%. Por lo que se necesitan 88 kWh de horas de sol pico, para producir 1 kg de glucosa $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$. Esta biomasa producida puede ser aprovechada de manera directa por combustión, tomando en cuenta que para quemarla se necesita realizar el pre secado en campo que se puede realizar con energía solar, en esta etapa se retira el agua libre y mediante un secado artificial en hornos, se extrae parte del agua higroscópica. El contenido de humedad final (XW_p) en el combustible sólido debe ser inferior al 15%, con el propósito de reducir las emisiones del CO.

Por otra parte, para mejorar los procesos de conversión de la energía existen instalaciones de cogeneración a partir de biomasa [2], para lo cual se pueden utilizar cultivos energéticos, residuos forestales y agrícolas. Otra posibilidad de aprovechamiento de la biomasa es por combustión indirecta, como es el caso del mosto de uva, por acción de levaduras, sus azúcares se transforman en alcohol, que a su vez puede usarse como fuente energética. Además, entre los procesos termoquímicos se encuentra la pirólisis donde la biomasa sólida, se somete a altas temperaturas cercanas a los 600°C , para obtener carbón vegetal, gas de síntesis y combustibles líquidos. Además, en los procesos biológicos, de conversión de la biomasa se utilizan ciertos organismos que se alimentan de esta materia prima (sustrato) y en sus procesos metabólicos descomponen las moléculas más simples pero de alto poder calorífico.

Para producir los biocombustibles de primera generación, se han utilizado, el maíz, caña de azúcar, sorgo, aceites vegetales y animales, con lo que se obtienen combustibles líquidos [3]. En los últimos años se están utilizando tierras de cultivos agrícolas que son poco rentables, para plantaciones de cultivos energéticos con especies herbáceas o leñosas como alternativa a los cereales extensivos [4]. Se puede obtener energía de la biomasa a partir de residuos orgánicos, aguas servidas, basura, residuos agrícolas y forestales, utilizando procesos de conversión biológica para obtener etanol, biodiesel, o biogás [5], siempre y cuando se cuente con las tecnologías adecuadas de transformación de los recursos disponibles poniendo especial interés en la seguridad alimentaria, ambiental y económica de una región o del país.

En la conversión biológica para la obtención de combustibles gaseosos se encuentra la fermentación anaeróbica, conocida

tradicionalmente como digestión que se realiza en ausencia de oxígeno [6]. Para la obtención del biogás se deben cumplir tres etapas tróficas, en las cuales participan un grupo de bacterias específicas, en la hidrólisis las bacterias hidrolíticas que degradan el sustrato, ya sean hidratos de carbono, lípidos y proteínas, en ácidos grasos, polisacáridos, productos neutros, posteriormente en la acidogénesis de las que se encargan las bacterias cetogénicas y homoacetogénicas, se produce ácido acético, H_2 y CO_2 partiendo del sustrato (lodo) hidrolizado. Para finalizar las bacterias metanogénicas transforman el CO_2 , el H_2 , y el ácido acético en metano (CH_4). Para la obtención de biogás de manera tradicional se han utilizado los digestores chino e hindú, que se construyen con mampostería de ladrillo. En este tipo de instalaciones el tiempo de retención hidráulico (TRH), y biológico (TRB), pueden ser muy prolongados. Por otra parte, debido a la porosidad de las paredes de los digestores y al nivel freático, se puede filtrar el agua hacia el interior, aumentando la cantidad de humedad del sustrato. Además, se presentan fugas por los ductos de alimentación de la materia prima. Por lo tanto, el uso de esta tecnología tradicional ya no es adecuado.

Existen otros tipos de digestores que sirven para procesos continuos o discontinuos en los cuales se añaden al sustrato catalizadores o ciertos tipos de bacterias para acelerar el proceso de fermentación, pero en la mayoría de casos pueden ser costosos. En la presente investigación se utiliza un método alternativo para producir biogás con mejores características energéticas y menor tiempo de fermentación, utilizando la energía solar de baja temperatura con captadores planos, para calentamiento de agua (ACS), que mantiene el sustrato a una temperatura constante de 26°C , durante el día y la noche.

Es importante dar a conocer la contribución de la biomasa en el contexto energético mundial. Este recurso renovable aporta con aproximadamente el 14.6%, distribuidos de la siguiente manera, en los países industrializados el aporte en el consumo energético total es del 2.8%, mientras que en los países en vías de desarrollo alcanza el 37.8 % del consumo energético total [7]. Además, según estimaciones del banco mundial, la biomasa es en la actualidad la principal fuente de energía de unos 2250 millones de personas por lo que es necesario seguir mejorando y optimizando los procesos de conversión energética de estos recursos para mejorar la calidad de vida y el entorno natural.

La biomasa en el mundo tiene un papel muy básico en mantener el entorno, de forma que es importante no solo las ventajas en el uso de la bioenergía, sino también los posibles efectos destructores locales y globales debido a la interferencia humana y tecnológica en estos procesos naturales [8]. En el

mediano y largo plazo la bioenergía aplicada en la generación de vapor pasaría de tener un rendimiento del 20% hasta un 40%, de acuerdo a lo que se explica en [9].

Entre las características de la materia prima para elaborar el sustrato se encuentra el contenido de celulosa del pasto [10] que tiene un porcentaje máximo de 32.8%. Dependiendo de la temperatura en la cual se desarrolle la digestión [11] aparecen unas especies bacterianas u otras, por lo que existen tres rangos de trabajo; psicrófilico (<25°C), mesófilico (25 y 45°C), y el termófilico (>45°C). Para preparar mezclas de estiércol de vacuno con vegetales se debe triturar la biomasa vegetal [12], esto permitiría obtener un sustrato con menores espacios intersticiales. Además de la temperatura, el incremento de la actividad bacteriana benéfica está relacionado con el incremento de materia orgánica [13]. Es decir, la materia orgánica es vital como fuente de alimento y refugio de los microorganismos. Para finalizar, existe un estudio donde se determina la factibilidad de integración entre la energía solar térmica y el proceso de digestión anaeróbica (DA). Con este propósito se realiza en [14] un modelo de simulación de un digestor (V=70 L) acoplado con un nuevo diseño de calentador solar térmico desarrollado con el programa TRNSYS. Sin embargo, en el presente proyecto se realiza el estudio experimental del proceso de fermentación anaeróbica de una carga de sustrato compuesta por estiércol de vacuno y pasto (*pennisetum clandestinum*), con calefacción solar utilizando colectores planos.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Biomasa

Para caracterizar las materias primas bioproducidas de metaño y sus rendimientos en biogás es necesario cuantificarlas por la cantidad de masa seca (M_s), y para el análisis estequiométrico de acuerdo con el contenido de celulosa. En el primer caso la masa seca del estiércol de vacuno y del pasto (*pennisetum clandestinum*), se determinan en función de su masa húmeda (M_h) y el contenido de humedad inicial (XW)

$$M_s = M_h \frac{100 - XW_i}{100} \quad (1)$$

Considerando los requerimientos de la ecuación (1), la humedad inicial del estiércol de vacuno que se recoge en el establo es del 79 %, y del pasto recién cortado del 67 %, valores que son característicos de cada biomasa [15]. En lo referente a la producción total de biogás y metano (CH_4), por kg de masa seca, el estiércol de vacuno produce 0.24 m^3/kg y 0.19 m^3/kg respectivamente, y los pastos 0.5 m^3/kg de biogás, y 0.42 m^3/kg de metano [16].

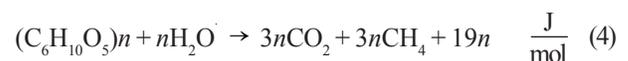
Por otra parte, si se requiere mejorar la producción de biogás y aumentar sus rendimientos de forma convencional, se deben evitar fluctuaciones térmicas en el interior y exterior del sustrato, mantener baja presión interna sobre el lecho bacteriano para no afectar su crecimiento por aplastamiento, controlar los niveles de pH entre 6.5 y 7.5, la relación carbono/nitrógeno (C/N) de 25/1 a 30/1, y usar catalizadores para reducir los tiempos de fermentación de la materia orgánica hidrolizada. Además, en el proceso previo a la preparación del sustrato, se debe tener en cuenta el tamaño de las partículas, especialmente de las hierbas y hojas secas, que deben ser trituradas para obtener harina vegetal, mediante el secado y molienda. Un material orgánico de gran tamaño puede aumentar considerablemente los tiempos de degradación del sustrato, y reducir la producción de biogás. En el secado del pasto se debe remover una cantidad de agua (ΔW), que se calcula con la siguiente función:

$$\Delta W = M_s \left[\frac{XW_i}{100 - XW_i} - \frac{XW_f}{100 - XW_f} \right] \quad (2)$$

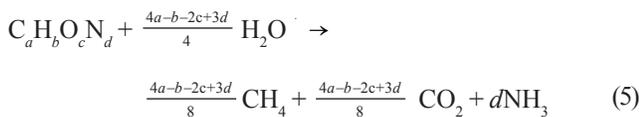
Donde: XW_i contenido de humedad inicial de la materia prima vegetal que viene del campo, en %; XW_f contenido de humedad final, en % luego del secado. Para el último término de la ecuación (2), se recomienda que el $XW_f = 12\%$, de acuerdo con lo indicado por Ortega [1]. A continuación, se necesita conocer la cantidad efectiva de *pennisetum clandestinum* a mezclar con el estiércol de vacuno, para lo cual es de utilidad reemplazar el valor de la relación (C/N) de cada componente en la expresión:

$$\frac{C}{N} = \frac{\%C_e M_e + \%C_p M_p}{\%N_e M_e + \%N_p M_p} \quad (3)$$

De allí que, el porcentaje de carbono en el estiércol $\%C_e = 32\%$, y del pasto $\%C_p = 41\%$. El porcentaje de nitrógeno del estiércol $\%N_e = 1.5\%$, y del *pennisetum clandestinum* $\%N_p = 1\%$. Estos datos corresponden a la caracterización físico-química de desechos existentes en el medio rural [10]. Después de realizar el balance de masas secas de estiércol (M_e) y pasto (M_p) es necesario estimar la cantidad de agua que hay que añadir en la mezcla para formar el lodo (sustrato), por lo que se pueden aplicar dos criterios. En el primero el lodo debe tener un contenido de humedad [1] superior al 85%. Y en el segundo caso, al considerar la celulosa ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) como componente principal de la biomasa, se puede calcular la cantidad de agua y los productos de la reacción, con la expresión dada para la fermentación anaeróbica [6]:



donde, n es el número de moles de celulosa y el término $19n$ es la cantidad de calor generado por la transformación bioquímica, por acción de los microorganismos. En la ecuación (4), se observa que por cada n moles de celulosa, hay que añadir n moles de agua. Además, si se requiere cuantificar el biogás que se produce en la fermentación anaeróbica de materiales orgánicos de rápida degradación, se puede utilizar el criterio de Zubkov y Burkill, el cual se complementa con la teoría de Tchobanoglous [17], donde se propone el modelo estequiométrico para la obtención de la cantidad de metano (CH_4) generado a partir de la expresión empírica $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$, obteniéndose una reacción típica definida por la ecuación:



Con la masa de los elementos constitutivos y la masa atómica, se calcula el número de moles de cada componente. En el siguiente paso se determinan los coeficientes a, b, c, d , considerando despreciable el número de moles de azufre, y tomando como menor valor para la división, el número de moles de nitrógeno. A continuación se halla el valor adimensional del metano, mediante la relación entre el contenido de metano y de la sustancia a degradar. La masa final de CH_4 es el producto entre masa seca, el contenido de metano y un factor de seguridad de 0.85. Con el procedimiento propuesto por Tchobanoglous [17], y utilizando la ecuación (5), para los residuos de poda se obtiene se obtiene una producción teórica de metano de 14.73 m^3 . Y con lo sugerido en la Bioconversión de la Energía [16] se obtiene 13.86 m^3 . Finalmente, La producción total de biogás en una carga es de 28.74 m^3 , masa de 34.48 kg equivalente 2.3 cilindros de gas (propano) de uso doméstico (véase Tabla 1).

2.2. Estudio del recurso solar

Para reducir el tiempo de retención hidráulico (TRH), y el tiempo de retención biológico (TRB), se utilizó la energía solar térmica para obtener agua caliente sanitaria (ACS), que se suministró por la región anular del digestor que contiene en la parte central el lecho de sustrato hidrolizado. La tecnología de calentamiento de agua consiste en el uso de colectores planos orientados al sur, con ángulo de inclinación de 20° . En

el dimensionamiento de colectores se consideró el Código Técnico de la Edificación (CTE) capítulo H₄, el cual indica lo siguiente: $60 < M/A < 100 \text{ L/m}^2\text{d}$.

Donde: M volumen que calienta el sistema, A área de captación de la energía solar. Un parámetro importante de esta investigación es la determinación del recurso solar local para el mes peor sobre superficie inclinada, la misma que se encuentra con la ecuación ISF [18] dada por la función:

$$G_{dm}(\beta) = A_0 G_{dm}(0) + B_0 (G_{dm}(0))^2 \quad (6)$$

$G_{dm}(0)$ irradiación solar sobre superficie horizontal en kWh/m^2 día, este parámetro puede ser tomado del mapa de radiación solar local, de los anuarios meteorológicos, datos de satélite (NASA), (GOES), Isocad, o mediante la medición con instrumentos llamados piranómetros para radiación global, directa y difusa del cielo. En la ecuación (6), el coeficiente A_0 , depende de la inclinación del colector, y del coeficiente de reflectividad del suelo (ρ). Para el pavimento, este valor es de 0.4, el coeficiente B_0 depende de la latitud del emplazamiento, la inclinación del panel y del mes del año. Encontrado $G_{dm}(\beta)$, para el mes peor, y al dividir para la media mundial de la irradiancia $I_m = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$, se obtienen las horas de sol pico (HSP).

Conocido (HSP), se puede encontrar la potencia térmica necesaria para el calentamiento del agua y del sustrato, con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{M_a}{\text{HSP}} c \Delta T \quad (7)$$

Donde: P extracción de energía por unidad de tiempo, en W ; M_a masa de agua, en kg ; ΔT diferencia de temperatura entre la suministrada por la red y la temperatura de proceso, en $^\circ\text{C}$; c capacidad calorífica del agua, en $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$. Por otra parte, con la expresión desarrollada por Hotel-Whillier y Bliss, se puede calcular la ganancia de energía instantánea por unidad de tiempo y unidad de área de los colectores planos [19]:

$$Q = F_R [E k \tau \alpha - U_L (T_1 - T_2)] \quad (8)$$

Donde: Q ganancia de energía instantánea por unidad de tiempo y unidad de área, en W ; F_R factor de remoción del calor; E irradiancia sobre el plano del colector, en W/m^2 ; k factor de

Tabla 1. Componentes químicos de los residuos de poda [17].

Componentes	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Ceniza
%	47.8	6.0	38.0	3.4	47.8	2-6
Masa atómica	12.011	1.0079	15.999	14.007	32.065	

sombra y suciedad; τ , transmitancia de la cubierta de vidrio; α , absortancia del captador, U_L coeficiente global de transferencia de calor, en W/m^2K ; T_1 y T_2 son las temperaturas de entrada y salida del agua en el colector solar plano, en $^{\circ}C$.

Por lo que, la cantidad de calor necesario para calentar el sustrato (lodo hidrolizado) está dado por:

$$Q_N = Q_u + Q_p \quad (9)$$

$$Q_u = \frac{M_s C_p (T_{s2} - T_{s1})}{HSP} \quad (10)$$

Donde: M_s masa del sustrato, en kg; C_p capacidad calorífica del lodo, en $kJ/kg^{\circ}C$; T_{s2} y T_{s1} temperatura inicial y final del sustrato, en $^{\circ}C$. La ecuación (10) tiene como base la expresión (7), añadiendo en el denominador el aporte solar en HSP. Además, el calor perdido por las paredes del digestor anaeróbico (Q_p) se calcula con la ley de Fourier:

$$Q_p = U_0 A_p (T_i - T_0) \quad (11)$$

Dónde: U_0 es el coeficiente global de transferencia de calor [20], para flujo de calor de agua que fluye y gas que fluye tiene un valor de 10 a 50 W/m^2K . A_p área de pared vertical del digestor, en m^2 ; T_i temperatura del agua en la región anular del digestor, en $^{\circ}C$; T_0 temperatura ambiente, en $^{\circ}C$.

2.3. Fracción solar

El método de las curvas f es uno de los más utilizados para hacer cálculos de las prestaciones en los sistemas de calentamiento de agua con energía solar térmica de baja temperatura inferior a $100^{\circ}C$. Se desarrolló en la Universidad de Wisconsin [21].

Definición del método. Siendo f , la fracción solar (porcentaje de la demanda que cubre el sol), se utiliza una función del tipo:

$$f = f(X, Y) \quad (12)$$

Para este caso se tiene las siguientes variables de diseño: área de captación, capacidad de almacenamiento, caudales de fluido, prestaciones de intercambiadores, en este caso de tipo tubular. Los tipos de sistemas que pueden evaluarse con el método son:

- Calefacción, y agua caliente sanitaria(ACS), donde el sistema de captación es de líquido o de aire.
- Producción de ACS solo, tanto con sistema de captación por líquido o aire.

Los parámetros adimensionales utilizados por el método son:

$$X = \frac{\text{pérdidas del captador}}{\text{demanda}} = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - T_a) \Delta t}{Lo} \quad (13)$$

$$X = \frac{\text{energía absorbida}}{\text{demanda}} = \frac{A_c F'_R (\tau\alpha) H_r}{Lo} \quad (14)$$

Donde: A_c área de captación, en m^2 ; F'_R factor captador-intercambiador; U_L coeficiente global de pérdidas del captador solar, en W/m^2K ; Δt tiempo total del mes, en s; T_a temperatura ambiente media mensual, en $^{\circ}C$; Lo demanda mensual de energía, en J; H_r radiación diaria media mensual sobre captadores, en J/m^2 ; N número de días del mes; $(\tau\alpha)$ media mensual del producto $\tau\alpha$; T_{ref} temperatura de referencia se toma de $100^{\circ}C$.

Para calcular el factor captador-intercambiador se utiliza la expresión:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \left[\frac{A_c F_R U_L}{(mC_p)_c} \right] \left[\frac{(mC_p)_c}{\varepsilon(mC_p)_{min}} - 1 \right] \right]^{-1} \quad (15)$$

Sistemas con líquido. Cuando el fluido de transferencia y almacenamiento es un líquido, que en este caso es el agua. La expresión que da la cobertura solar en función de los parámetros definidos es:

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad (16)$$

Cuando la capacidad de almacenamiento no es de $75 L/m^2$, debe modificarse el parámetro X , antes de utilizar la correlación:

$$\frac{X_c}{X} = \left[\frac{V/A_c}{75} \right]^{-0.25}$$

3. Diseño experimental

El equipo de fermentación anaeróbica con calefacción solar tiene las siguientes características técnicas:

- Volumen máximo del sustrato 700 litros,
- Volumen de ACS 277 litros,
- Inclinación de colectores planos: 20° hacia el sur,
- Número de colectores: 6,
- Presión biogás: 80 PSI,
- Temperatura del sustrato: $26^{\circ}C$,
- Rango mesofílico se logra con la temperatura del fluido de proceso de 25 a $45^{\circ}C$.

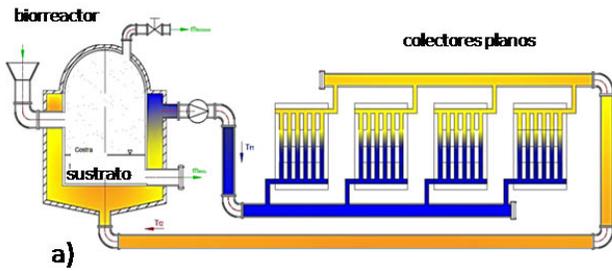


Fig. 1. Digestor con calentamiento del sustrato con energía solar.

3.1. Equipo utilizado

En la instalación solar térmica para calentamiento del sustrato con energía solar, el fluido caliente (ACS) se suministra por la parte inferior del recipiente, hacia la región anular del digestor (véase Fig. 1a), con el fin de producir flujo constante de calor por convección natural. El tanque de acumulación que contiene el sustrato y el gas tiene una capacidad de 0.5 m³ (véase Fig. 1b).

En la Fig. 2 se presenta un corte de los cilindros concéntricos, con el propósito de desarrollar el procedimiento para encontrar los coeficientes U_i , U_o de transferencia de calor hacia el sustrato y la pérdida de energía térmica hacia el exterior del recipiente. Estos coeficientes se establecen a partir de Pitts [22], y se estructuran para el modelo de transferencia de calor en el digestor anaeróbico con calefacción solar.

$$U_i = \frac{1}{\frac{r_1}{r_i h_s} + \frac{r_1 \ln(r_1/r_i)}{k_a} + \frac{r_1}{(r_2 - r_1)h_0}} \quad (17)$$

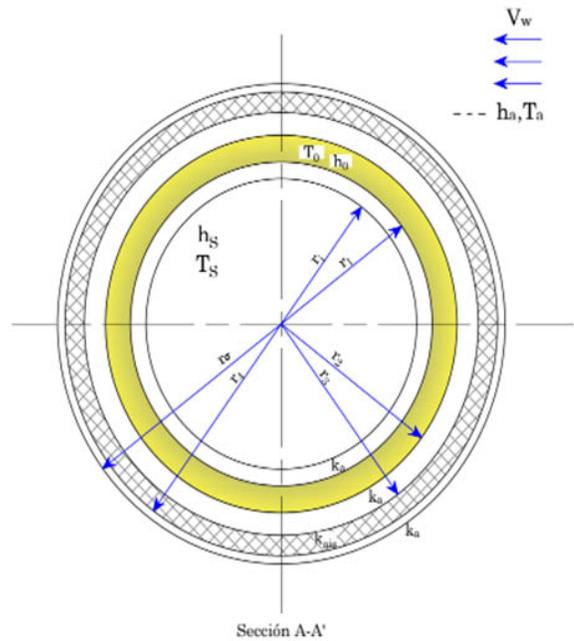


Fig. 2. Paredes compuestas del digestor de cilindros concéntricos con calefacción solar.

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_0}{(r_2 - r_1)h_0} + \frac{r_0 \ln(r_3/r_2)}{k_a} + \frac{r_0 \ln(r_4/r_3)}{k_{ais}} + \frac{r_0 \ln(r_0/r_4)}{k_a} + \frac{1}{h_e}} \quad (18)$$

Donde: h_s coeficiente de convección para el sustrato, en W/m²K; k_a conductividad térmica del acero, en W/mK; k_{ais} conductividad térmica de la lana de roca; en W/mK; h_e coeficiente de convección externo. También, se pueden encontrar los coeficientes de transferencia de calor para varias aplicaciones de acuerdo con Beek y Muttzal [20]. Para agua y otros líquidos $U_i = 200-1000$ W/m²K, y $U_o = 10-50$ W/m²K. U_o se reemplaza en la ecuación (11) descrita anteriormente.

Por otra parte, para analizar el campo de colectores se parte de los conceptos energéticos definidos en [19] y [23] para el balance de energía y las propiedades ópticas de los materiales. El modelo se observa en la Fig. 3.

El campo de colectores planos de la Fig. 1 puede suministrar con energía solar (gratuita y no contaminante) una potencia térmica máxima de 6 kW, suficientes para mantener la carga de sustrato de 693 kg, a una temperatura promedio de 26°C. Si el digestor se calienta con resistencias eléctricas, se tendría un

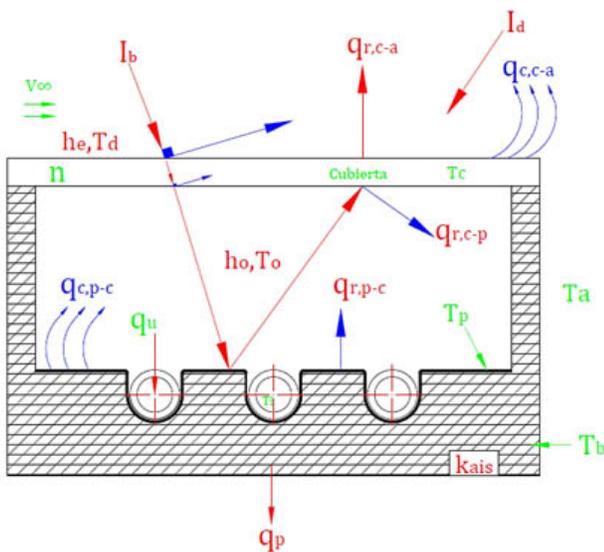


Fig. 3. Flujos térmicos en el colector solar plano.

coste mensual por pago de electricidad de 81 (USD). Además, no es bueno convertir la electricidad que es una energía de alta calidad en calor de baja calidad mediante el efecto Joule.

Suponiendo cubierta transparente para la mayor del espectro solar, el balance energético es el siguiente:

$$\alpha_c(q_{r,p-c} + q_{r,s-c}) + q_{r,p-c} = q_{r,c-a} + q_{r,c-p} + q_{c,c-a} \quad (19)$$

Para la placa absorbidora de color negro mate, el balance energético por unidad de área es:

$$\alpha_p(\tau_c I_b + q_{r,c-p}) = q_{r,p-c} + q_{c,p-c} + q_d + q_u \quad (20)$$

Donde: α_c absortancia de la cubierta; $q_{r,p-c}$ calor de radiación de la placa a la cubierta; $q_{r,c-p}$ calor de radiación del cielo a la cubierta; $q_{r,c-a}$ calor perdido por radiación desde la cubierta al ambiente; $q_{r,c-p}$ calor de radiación entre la cubierta y la placa; $q_{c,c-a}$ transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente; α_p absortancia de la placa; τ_c transmitancia de la cubierta de vidrio; I_b irradiación solar directa, en W/m^2 ; q_d pérdida de calor por conducción; q_u calor útil necesario para calentar el ACS (Agua Caliente Sanitaria).

3.2. Descripción del proceso

Para realizar el ensayo se utiliza el siguiente procedimiento:
- Determinación de las variables de medición: presión, temperaturas, humedad relativa, radiación global, albedo.

- Verificación del estado funcional de los instrumentos de medición.
- Verificación del estado técnico y funcional del digester, colectores, tuberías, tuberías de agua fría y caliente.
- Carga del sustrato en el digester anaeróbico con cargas que se indican en la Tabla 2.
- Toma de datos y mantenimiento externo de colectores, evacuación de agua caliente sanitaria.
- Análisis de los datos y el promedio diario.
- Lectura de presión de biogás.
- Descarga de biogás para procesos de corte de plancha de acero.

La materia prima que se carga en el digester está compuesta por: estiércol de vacuno, *pennisetum clandestinum*, urea y agua en las proporciones que se indican en la Tabla 2.

4. Resultados

La Tabla 3 contiene los parámetros energéticos en media diaria mensual de tres meses de ensayos del digester anaeróbico, donde se observa que la irradiación solar en estos meses es baja debido a la presencia de nubosidad y lluvias típicas de la estación invernal, de igual manera las horas de máxima insolación (HSP) son únicamente 3.75 horas. En este lapso de tiempo se calienta el fluido de trabajo (ACS). Para analizar los resultados se consideran los datos tomados durante el periodo de monitoreo del 18 de octubre al 16 de noviembre de 2012, porque corresponden a un periodo donde se obtiene buena estabilidad energética, tanto en el proceso de digestión y en el aporte solar.

4.1. Análisis de resultados

De acuerdo con la Fig. 4, el incremento de la presión interna del biogás en función del tiempo, entre descargas guarda una relación lineal debido a que el crecimiento de los microorganismos generadores del gas mantienen una importante actividad metanogénica. De allí que, es necesario indicar que si la presión es constante o empieza a decrecer [24], se debe a un

Tabla 2. Materia prima para formar el sustrato hidrolizado.

ORDEN	COMPONENTE	UNIDAD	CANTIDAD
1	estiércol de vacuno	kg	243
2	<i>pennisetum clandestinum</i>	kg	100
3	urea	kg	4
4	agua	kg	346
	CARGA TOTAL	kg	693

Tabla 3. Parámetros energéticos del proceso de fermentación anaeróbica.

Parámetros energéticos en media diaria mensual	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	PROMEDIO
Temperatura ambiente, T_a (°C)	22.95	19.71	20.27	20.98
Velocidad del viento, V_w (m/s)	0.62	0.43	0.33	0.46
Irradiancia solar, I (W/m ²)	523.73	453.79	497.79	491.77
Humedad relativa, HR (%)	49.35	63.53	56.36	56.41
Temperatura del agua de red, TRE (°C)	19.00	19.00	19.00	19.00
Temperatura inferior del digestor, TFB; (°C)	12.06	10.73	9.78	10.86
Temperatura del sustrato, TS (°C)	26.19	25.41	25.76	25.79
Temperatura de ingreso a colectores, T1 (°C)	25.56	22.66	22.55	23.59
Temperatura de salida de colectores, T2 (°C)	33.99	33.35	33.72	33.69
Presión interna del digestor, P_B (PSI)	44.89	84.71	56.35	61.98
Albedo de la hierba, I_a (W/m ²)	89.37	77.47	88.27	85.04
Horas de sol pico, HSP	3.88	3.63	3.73	3.75

salto térmico en el (ACS) por el aumento de la radiación solar que puede sobrepasar los 1000 W/m² en el verano. La población bacteriana es muy sensible a los cambios bruscos de temperatura que inhibe su crecimiento e incluso muere a temperaturas sobre los 48°C.

Para determinar las bondades del proceso de fermentación anaeróbica con calefacción solar del sustrato a 26°C, se tienen algunos aspectos importantes entre los cuales se puede indicar los siguientes: En los recipientes sin aporte térmico, se logra una presión interna del biogás de 18 (PSI) en 20 días, mientras que de acuerdo con la Fig. 4, esta presión se supera en solo 5

días después de haber realizado la carga, con lo que se puede afirmar que la actividad bacteriana es más representativa al utilizar (ACS). Otro aspecto está relacionado con la rapidez de producción de gas, en el primer caso se obtiene biogás a los 60 días de fermentación, y en el digestor con camisa de agua caliente sanitaria se produce biogás en solo 12 días con una composición de (CH₄) del 23.8% y (CO₂) del 75.03%. Por otra parte, es necesario indicar que en la investigación preliminar de este proyecto se utilizaron 10 recipientes cilíndricos para cargar mezclas de estiércol de vacuno y pasto, de los cuales solo en 4 digestores produjeron biogás y en los 6 restantes no se produjo actividad bacteriana, consiguiendo una efectividad tan solo del 40%, debido a los cambios bruscos de temperatura ambiental y a la ausencia de suministro de calor a los tanques. Posteriormente al realizar las cargas en el nuevo digestor con calentamiento indirecto mediante energía solar se puede alcanzar una efectividad del 100%.

A continuación, en la Fig. 5 y Fig. 6, se presentan los perfiles de temperatura del (ACS), sustrato y del ambiente correspondientes al digestor y colectores planos.

La temperatura del sustrato tiende a mantenerse en 26°C, durante la fermentación de la materia orgánica, debido al aporte térmico solar y a la generación de calor producido por los microorganismos. La

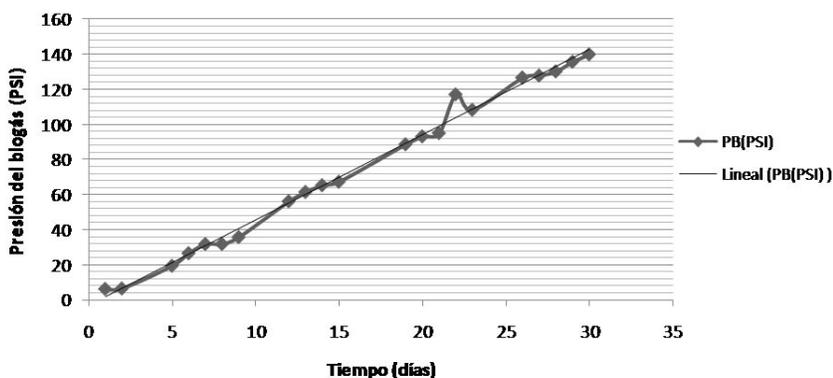


Fig. 4. Incremento constante de la presión interna del digestor, en 30 días de fermentación se alcanza 142.7 PSI; donde la ecuación de tendencia es $P = 4.8538t - 2.9114$ con $R^2 = 0.9928$.

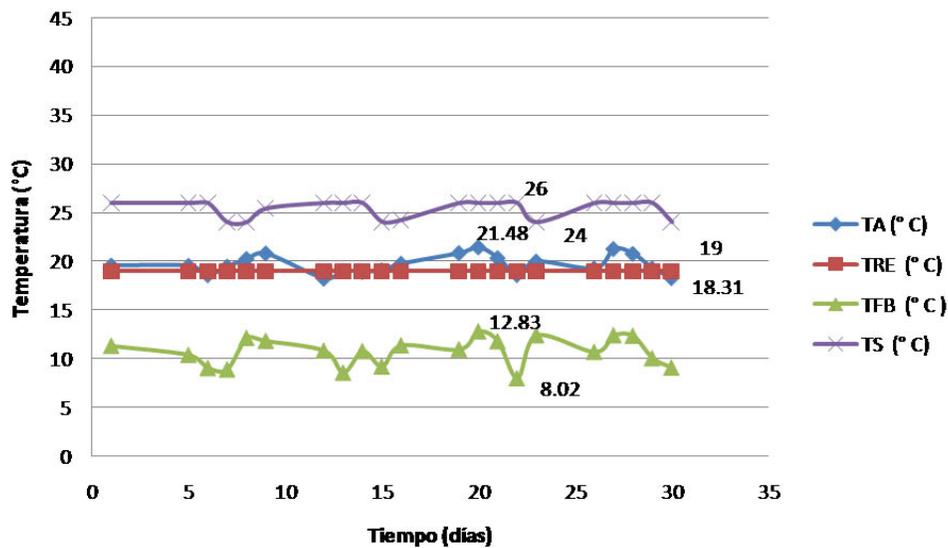


Fig. 5. Temperatura del sustrato, BIOL.

temperatura de suministro del agua (TRE), se mantiene constante en un valor 19°C.

El agua caliente que suministra el campo de colectores planos, llega al digestor a una temperatura promedio de 35°C, a lo largo del intervalo de tiempo (días) de retención de la biomasa.

5. Conclusiones

Existen varios aspectos que son relevantes en este proceso de fermentación anaeróbica, entre ellos la relación C/N que

debe estar en el intervalo de 25/1 a 30/1, el tipo de biomasa vegetal y su tamaño para mejorar la producción de biogás, la elaboración de las mezclas para obtener un lodo con contenido de humedad superior al 85%, el nivel de pH entre 6.5 y 7.5, la temperatura de permanencia del sustrato de 26°C, lograda durante las 24 horas con el aporte solar. Sin este medio de calentamiento, la temperatura del sustrato bajaría a 8°C, afectando totalmente la producción bacteriana. Por otra parte, una característica importante para saber de manera indirecta la bondad del proceso fue el incremento diario de la presión interna del recipiente en el orden de 4.8 PSI/día.

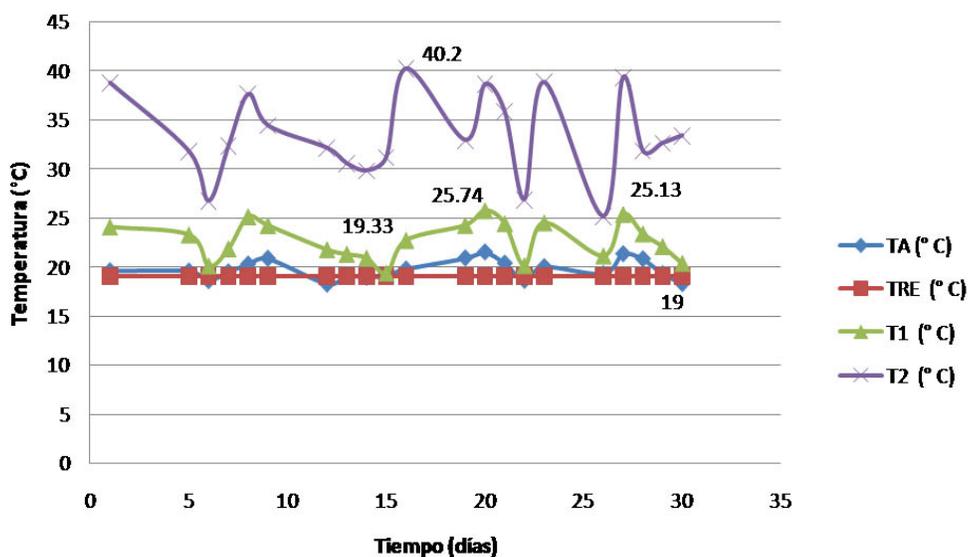


Fig. 6. Temperatura T1, T2 de entrada y salida del agua calientes sanitaria (ACS).

En la etapa previa al desarrollo del digestor con calefacción solar, se realizaron ensayos de fermentación anaeróbica utilizando mezclas combinadas de estiércol de vacuno y pasto. Los tanques no tenían calefacción, es decir estaban expuestos a la intemperie y sometidos a los cambios de temperatura ambiente en el intervalo de 22°C a 11°C. En lo referente a la presión del biogás en el cilindro con mejor proceso de degradación del sustrato se consiguió 18 (PSI) en 20 días. En el transcurso de 60 días solo 4 digestores produjeron biogás y en los 6 restantes no se produjo ninguna actividad bacteriana, consiguiendo una efectividad tan solo del 40%.

Partiendo de los escasos resultados obtenidos en los 10 recipientes cilíndricos, y con el propósito de mejorar el proceso de producción de biogás se procedió al desarrollo e implementación del digestor anaeróbico calentado con energía solar, logrando en solo 12 días de fermentación un biogás con composición química de (CH₄) del 23.8% y (CO₂) del 75.03%.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación sobre las aplicaciones de energía solar para mejorar la producción de biogás, se realizó con la cooperación técnica del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador, y del Centro de Investigaciones Energéticas Tecnológicas y Ambientales CITECNIA CORP., Instituciones a las cuales los autores expresan su profundo agradecimiento. Además, no podemos olvidar al selecto grupo de profesionales que apoyaron esta noble causa, para ellos nuestro sentimiento de infinita gratitud.

Referencias

- [1] M. Ortega Mario, *Energías renovables*, Madrid, España: Paraninfo, 2000.
- [2] A. Madrid, *Energías renovables*, Madrid, España: AMV Ediciones, 2009.
- [3] B. Linscott, *Renewable Energy*, 5a ed., Oklahoma, USA: Tate Publishing Enterprises, 2011.
- [4] J. González-Velasco, *Energías renovables*, Barcelona, España: Reverté, 2009.
- [5] R. A. Hinricgs, M. Kleinbach, *Energy, Its Use and the Environment*, 4a. ed., Belmont, CA, USA: Thomson, 2006.
- [6] B. Sorensen, *Renewable Energy*, 4a. ed., Burlington, USA: Elsevier, 2011.
- [7] J. M. de-Juana, *Energía renovables*, Madrid, España: Thomson-Paraninfo, 2003.
- [8] G. G. García, *Energías del siglo XXI*, Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 2008.
- [9] J. Fanchi, *Energy, Technology and Directions to the Future*, Burlington, USA: Elsevier, 2004.
- [10] H. J. Correa, M. L. Pavón, J. E. Carulla, "Valor nutricional del pasto kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) para la producción de leche en Colombia: I-composición química y digestibilidad ruminal y posruminal," *Livestock Research for Rural Development*, vol. 20, núm. 4, 2008.
- [11] D. Cendales, S. Rincón, *Producción de biogás mediante la codigestión de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bobino*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [12] J. F. Herrán, R. Serrato-Flores, A. Armenta-Bojórquez, "Propiedades microbiológicas de compostas maduras producidas a partir de diferente materia orgánica, Ra Ximhai," *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, vol. 6, núm. 1, 2010.
- [13] L. J. Sikora, D.E. Stott, "Soil organic carbon and nitrogen," In: *Methods for assessing soil quality, SSSA Special Publication 49*, USA: Soil Science Society of America, pp.157-167, 1996,
- [14] B. Ouhammou, M. Aggour, A. Frimane, "Feasibility study of integrating solar energy into anaerobic digester reactor for improved performances using TRNSYS Simulation: application Kenitra Morocco," *4th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2017*, Porto, Portugal, Energy Procedia 13, pp. 402-407, 2017.
- [15] Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas, *Cómo construir un digestor*, Lima, Perú: ITINTEC, 1983.
- [16] J. Vega, F. Castillo, J. Cárdenas, *La bioconversión de la energía*, Madrid, España: Pirámide, 1983.
- [17] G. Tchobanoglous, F. Kreith, *Handbook of solid waste management*, 2a. ed., USA: McGrawHill, 2002.
- [18] Ingeniería sin Fronteras (ISF), *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo*, Madrid, España: IEPALA, 1999.
- [19] J. I. B. Wilson, *La energía solar*, Madrid, España: Alhambra, 1982.
- [20] F. Kreith, *Principios de transferencia de calor*, 6a. ed., México: Thomson, 2001.
- [21] J. Duffie, *Solar Engineering Thermal Processes*, 3a. ed., New Jersey, USA: Jhon Wiley, 2013.
- [22] D. R. Pitts, *Transferencia de calor*, Bogotá: McGraw-Hill, 1980.
- [23] R. Almanza, *Ingeniería de la energía solar*, México: El Colegio Nacional, 1994.
- [24] F. Vega, R. Rodríguez, L. Cumbal, J. Guasumba, *Sistema de Biodegradación Acelerada para la Reutilización de Desechos Vegetales*, Ecuador: Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército-Ecuador, 2006.