

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ENTERRADO

Martín Morales^a María del S. Vilte^b y Angélica Boucíguez^b

^a*Becario UNSa - CONICET. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150 – Salta, Argentina. Tel 0387 –4255424. e-mail: morales.martin.alberto@gmail.com.*

^b*Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150 – Salta, Argentina. Tel 0387 –4255424. e-mail: mvilte88@gmail.com; acbouciguez@gmail.com.*

Palabras claves: biodigestión anaeróbica, biogas, control térmico, sustrato.

Resumen: Se presenta el estudio numérico – experimental de la distribución de temperaturas en el interior de un biodigestor anaeróbico, que contiene una mezcla de 50% de estiércol vacuno y 50% de agua, se considera que el digestor se encuentra enterrado cubierto con una membrana plástica y expuesto a la radiación solar. Se han medido los parámetros térmicos de la materia orgánica contenida en él y las temperaturas en las condiciones de funcionamiento. Se ha realizado un modelo numérico que permite evaluar la distribución de temperaturas que alcanzará el biodigestor en las condiciones de operación propuestas, lo que permitirá determinar la factibilidad de operación de tal biodigestor para su posterior producción de biogás.

1 INTRODUCCION

La biodigestión anaeróbica consiste básicamente en la degradación de la materia orgánica en ausencia total de oxígeno. Como resultado de ello, se obtiene una mezcla de gases conocido como biogás. Entre los parámetros de control del proceso, la temperatura es uno de los más importantes ya que mantenida en un determinado rango permite una producción de gas razonable. Los biodigestores pueden operar en un amplio rango de temperaturas pero, una vez iniciado el proceso de biodigestión, ésta debe mantenerse tan constante como sea posible. (Verma, 2002)

Por ello, mantener la temperatura lo más estable posible asegura la continuidad en la producción de biogás. Asimismo, a mayor temperatura mayor será la velocidad con que se degrada la materia y por lo tanto mayor será la producción de biogás en un menor periodo de tiempo. (Pfeffer, 1974; Ten Brummeler, 1993; Verma, 2002)

En general, como materia prima, se utiliza sustancia orgánica proveniente de desechos animales o vegetales; mezclados con un cierto porcentaje de agua; lo que se denomina sustrato. En este caso, se ha considerado como sustrato estiércol vacuno diluido en agua, en iguales porcentajes.

El biodigestor se encontrará enterrado con la superficie libre cubierta por polietileno LDT de 150 micrones, del tipo utilizado en invernaderos; a los efectos de exponerlo a la radiación solar y evitar el enfriamiento por efectos del viento. El interior del biodigestor contiene la mezcla de estiércol y agua, así como el gas que él produce (una mezcla de metano y dióxido de carbono), el que al ser evacuado constituye el gas a utilizar. Un esquema del mismo se muestra en la Figura 1.

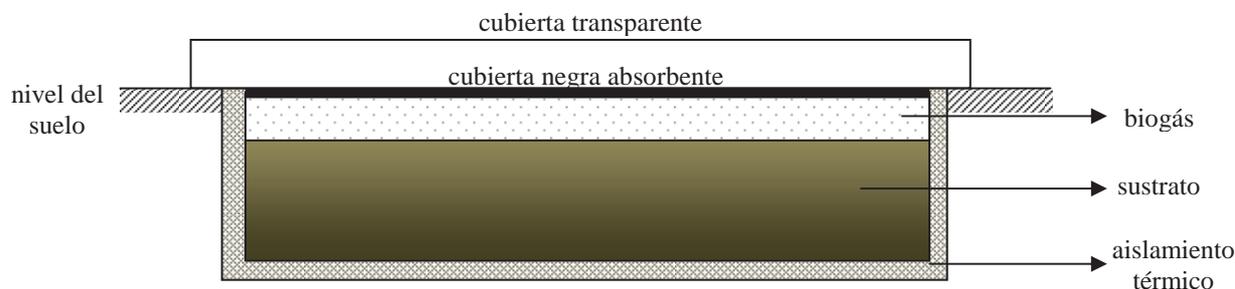


Figura 1: Esquema del biodigestor enterrado, conteniendo sustrato y gas, con la cubierta.

El sustrato se removerá periódicamente (1 vez al día) para uniformizar su temperatura. A los efectos del cálculo se considera el problema unidimensional en la dirección de z , siendo $z=0$ el nivel del suelo y $z=z_0$, la profundidad del digestor.

Se presenta a continuación, la descripción del dispositivo experimental utilizado para la caracterización de los parámetros térmicos del sustrato; el modelo numérico para el diseño del biodigestor, los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se ha arribado.

2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

La experiencia para medir los parámetros térmicos del sustrato fue realizada en el laboratorio. En la Figura 2, se muestra el dispositivo utilizado y un esquema con los sensores de temperatura colocados en el interior del recipiente que contiene la materia orgánica a analizar, el que fue colocado sobre un agitador magnético marca By Decalab, Fbr, que funciona conectado directamente a red.



Figura 2: Dispositivo experimental utilizado para determinar los parámetros térmicos del sustrato.

Para la determinación de tales parámetros, se ensayaron experiencias de ciclos de calentamiento y enfriamiento del material contenido en un recipiente cilíndrico de acrílico de 3 mm de espesor, 22 cm altura y 5 cm de diámetro interior; la muestra alcanza una altura de 14 cm en el mismo. Los laterales se aislaron térmicamente para evitar pérdidas de calor al ambiente. El calentamiento se realizó utilizando un calefactor, aislado térmicamente en su parte inferior, que consta esencialmente de una resistencia $R=110\ \Omega$ y demás elementos que le dan rigidez, uniformidad, conectado a una fuente de tensión V , lo que permite obtener una potencia de calentamiento prácticamente constante dada por $P=V^2/R$. Una plancha de aluminio de 1 mm espesor constituye la base del tubo que contiene la muestra y se encuentra en contacto directo con el calefactor, la que permite uniformizar el flujo de calor suministrado y asegurar una buena transferencia de calor a la muestra. Una vez nivelados los elementos y manteniendo la sustancia continuamente agitada a fin de homogeneizar el sustrato, se inicia el calentamiento elevándose la temperatura de la sustancia, la que no debe superar los $40\ ^\circ\text{C}$ para evitar su degradación. A fin de medir las propiedades térmicas mencionadas se colocaron varios sensores de temperatura a lo largo del eje vertical que pasa por el centro del tubo y que se introducen a través de una perforación en la tapa del recipiente como se observa en la Figura 2. Así se disponen de seis sensores que registran las temperaturas en el interior de la sustancia a distintas alturas: el primero en la base del recipiente en contacto con el sustrato, el segundo a 2,5 cm de la superficie de la base y a partir de este, los cuatro restantes se ubican en forma consecutiva cada 2 cm, se registra también, la temperatura ambiente.

Los sensores son específicamente pares termoelectrónicos de cobre-constantan, tipo T, ensamblados en módulos ADAM, alimentados por una fuente de 12 V, que conectados a una PC permiten almacenar los registros térmicos obtenidos para su posterior procesamiento. El registro de las temperaturas se realizó cada 60 segundos.

Para la determinación de la conductividad térmica, se empleó la Ley de Fourier de transmisión del calor por conducción a través de la muestra, cuya expresión está dada por:

$$\dot{q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde k es la conductividad del sustrato, ΔT es la diferencia de temperatura entre dos puntos consecutivos dentro de la muestra y Δz es la distancia entre ellos ($|\Delta z|=2$ cm); $A=1,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ es el área normal a la dirección del flujo de calor q , el que se determina a través de la potencia eléctrica P aplicada.

La difusividad térmica α indica como fluye el calor por el material: cuanto más alta es, mayor es el ritmo de propagación del perfil de temperatura, se la ha calculado empleando la conocida ecuación de difusión del calor, expresada por:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}$$

Donde $T(z, t)$ es la temperatura, función de la coordenada espacial, z y la temporal t . Del ensayo experimental se obtiene la evolución temporal de la temperatura en tres puntos espacialmente diferentes ubicados sobre una misma línea del flujo térmico, por lo que digitalizando esta ecuación resulta la expresión:

$$\frac{T(z, t + \Delta t) - T(z, t)}{\Delta t} = \alpha \frac{[T(z + \Delta z, t) - 2T(z, t) + T(z - \Delta z, t)]}{\Delta z^2}$$

Donde el primer índice indica la variación espacial y el segundo índice la temporal, siendo $\Delta t=60$ seg. y $\Delta z=2$ cm.

Los valores obtenidos son:

- ✓ conductividad térmica $k=2.26 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
- ✓ difusividad $\alpha=2.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg.}$

Con estos valores se ha realizado la simulación numérica del comportamiento térmico del biodigestor.

3 FORMULACION MATEMATICA DEL PROBLEMA Y MODELO DE CALCULO

Debido a que la temperatura es un factor fundamental en la biodigestión, se ha realizado una simulación numérica, que permite calcular la distribución de temperaturas en el interior del biodigestor enterrado, a los fines de considerar la factibilidad del proceso en las condiciones previstas de operación; lo que permitirá realizar el diseño más adecuado para la construcción del biodigestor que opere en las condiciones de temperatura establecidas, para su posterior funcionamiento.

El problema numérico a resolver resulta completamente descrito por la ecuación de difusión en la fase líquida, sujeta a las correspondientes condiciones iniciales y de borde. (Bejan, 1993)

Se designa con $u(z, t)$ la temperatura, función de la posición z y el tiempo t , en todo el tanque biodigestor, con $u_0(t)$ la temperatura, función del tiempo, en la superficie del polietileno negro, siendo z_0 la profundidad del digestor y z_1 la posición de la superficie de separación entre el sustrato y el gas emanado por él. La difusividad térmica α , y la temperatura u se identifican con el subíndice 1 para el gas y con el 2 para el sustrato. Se pide continuidad en la temperatura en la superficie libre del sustrato en contacto con el gas y se considera que en $z=z_0$, la tierra se comporta como un aislante térmico. El problema resulta descrito por las ecuaciones (1) a (6), siendo τ el tiempo total de cálculo.

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \quad 0 < t < \tau \quad 0 < z < z_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} \quad 0 < t < \tau \quad z_1 < z < z_0 \quad (2)$$

$$u_1(0, t) = u_0 \quad 0 < t < \tau \quad (3)$$

$$u_1(z_1, t) = u_2(z_1, t) \quad 0 < t < \tau \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_2(z_0, t)}{\partial z} = 0 \quad 0 < t < \tau \quad (5)$$

$$u(z, 0) = f(0) \quad 0 < z < z_0 \quad (6)$$

Las ecuaciones (1) y (2) son las de difusión en el gas y en el sustrato, respectivamente; las (3), (4) y (5) las condiciones de contorno y la (6), da la distribución inicial de temperatura; en ella, no se ha distinguido u , con subíndice porque se considera la temperatura en todo el interior. Además, $z=z_1$, indica la posición de la superficie libre del sustrato en contacto con el gas que él produce.

A los efectos del cálculo se han tomado, para el gas, los valores ponderados de las propiedades térmicas de cada uno de sus componentes, resultando: $\rho=1.15\text{kg/m}^3$; $k=0.025\text{W/m K}$; $c=1650\text{J/Kg K}$; mientras que para el sustrato los valores obtenidos de la experiencia descrita precedentemente.

Para resolver numéricamente el problema se han discretizado estas ecuaciones, siguiendo el esquema tradicional en diferencias finitas explícitas (Carnahan, Luther y Wilkes, 1969). El programa se ha desarrollado empleando el lenguaje *Matlab*, que permite además de realizar los cálculos necesarios, graficar los resultados obtenidos por el modelo.

4 RESULTADOS OBTENIDOS.

Se presentan en la [Figura 3](#) los registros medidos de las temperaturas de la cubierta negra (en color azul) y la ambiente (en color verde), que corresponden a un día típico de invierno en Salta. Se presenta, también la función polinómica (en color rojo) que aproxima la temperatura en la cubierta, la que se ha utilizado en el cálculo; donde se evidencia buen ajuste obtenido.

La aproximación polinómica mencionada está dada por:

$$T(t) = -1,13 \cdot 10^{-8} \cdot t^{10} + 1,18 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot t^9 + 4,86 \cdot 10^{-5} \cdot t^8 + 9,29 \cdot 10^{-4} \cdot t^7 + 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^6 - 7,57 \cdot 10^{-2} \cdot t^5 + 1,63 \cdot t^4 - 11,72 \cdot t^3 + 38,93 \cdot t^2 - 57,89 \cdot t + 42,52$$

Las medidas de temperatura se realizaron directamente sobre el suelo, en una superficie de 6 cm de diámetro, donde se colocó la cubierta la transparente y la negra; registrándose la temperatura de esta última.

En la [Figura 4](#) se presentan los resultados de la simulación numérica para las temperaturas del biogás y del sustrato en el fondo del digestor y a la mitad de éste, conjuntamente con la de la placa negra absorbente, utilizada como condición de borde.

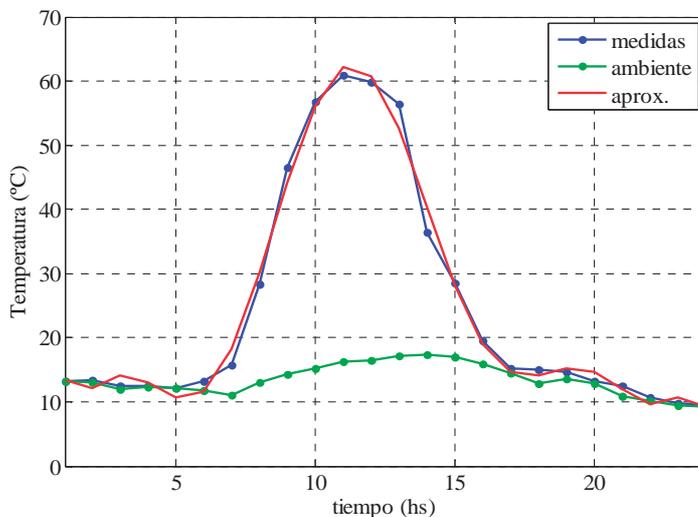


Figura 3. Datos experimentales de la temperatura en la cubierta negra, con su aproximación polinómica y la ambiente

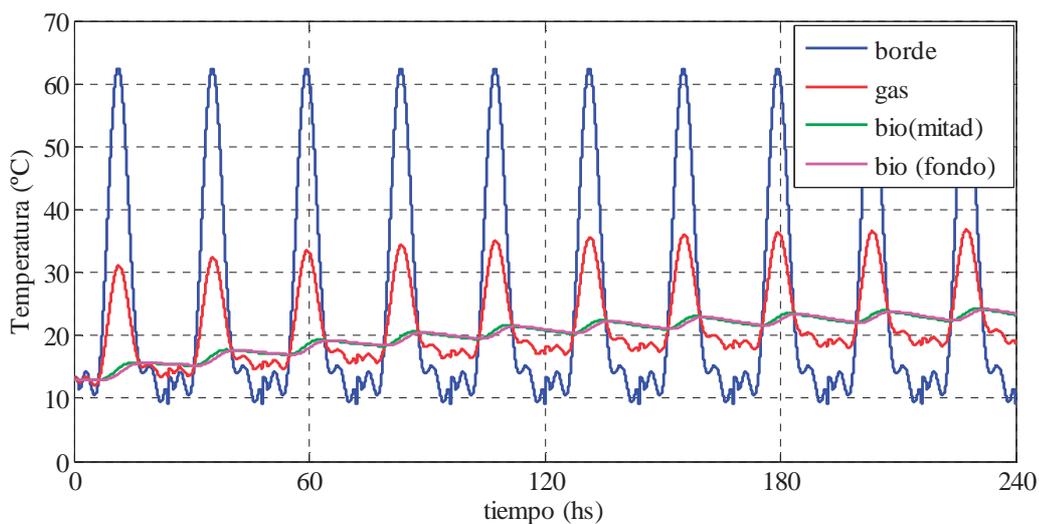


Figura 4. Temperaturas en el interior del biodigestor y en la placa absorbente.

En ella, se observa que tanto el sustrato y el ambiente se encuentran inicialmente en 13°C , de acuerdo a lo registrado en la Figura 3. A medida que transcurre el tiempo, la temperatura del sustrato aumenta gradualmente hasta llegar a los 23°C , al cabo de los 10 días calculados.

Como era de esperar los cambios de temperatura son más notorios en el biogás que en el sustrato, por encontrarse más cerca de la cubierta negra. A partir de las 100 hs ($\cong 5$ días), la temperatura del sustrato alcanza los 20°C y se mantiene por encima de este valor hasta el final del cálculo, lo que asegura que el proceso de biodigestión es sostenible.

Se aprecia, también que las temperaturas en el fondo y la mitad del sustrato se mantienen muy próximas entre sí, esto se debe a su composición; lo que favorece también el proceso de biodigestión.

El aumento de la temperatura en el sustrato beneficia considerablemente la producción de biogás, por lo que la placa absorbente negra junto con la cubierta transparente crea condiciones favorables para la producción de biogás.

5 CONCLUSIONES

El dispositivo experimental utilizado ha permitido determinar, en condiciones de operación reales, los parámetros térmicos del sustrato.

El modelo de simulación numérica, permite evaluar y visualizar, las temperaturas alcanzadas en el interior del digestor: sustrato y gas producido.

La utilización de la energía solar, colocando simplemente una cubierta transparente y una negra absorbente, contribuye a mantener temperaturas estables en el digestor, lo que favorece su rendimiento.

Las temperaturas alcanzadas en el sustrato permiten alcanzar una razonable rapidez de degradación del sustrato a diferencia de un digestor tradicional enterrado, en donde las temperaturas de trabajo son menores.

6 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación N° 1886 y del Trabajo de Investigación N° 1941 del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, a quien se agradece su financiamiento.

7 REFERENCIAS

- Bejan, A., Heat Transfer Cap. 4. *John Wiley & Sons, Inc. Canadá*, 1993
- Carnahan, B, Luther, H y Wilkes, J., Applied Numerical Methods. Ca. 7. *John Wiley & Sons, Inc. Nueva York*, 1969.
- Pfeffer, J., Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse. *Biotechnology and Bioengineering*. N° 16: 771-787, 1974.
- Ten Brummeler E., Dry anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste, *Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands*, 1993
- Verma S., Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid waste. *Thesis for Master Sciences. Columbia University. USA*, 2002.