

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE ACONDICIONAMIENTO TERMICO DE UN BIODIGESTOR CON SUSTANCIAS DE CAMBIO DE FASE

Martín A. Morales^a, Angélica C. Boucíguez^b y Gloria del C. Plaza^c

^a*Becario UNSa-CONICET. Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, martin.alberto.morales@gmail.com.*

^b*Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, acbouciguez@gmail.com.*

^c*Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, gloria@unsa.edu.ar.*

Palabras claves: biodigestor, acondicionamiento térmico, sustancias de cambio de fase.

Resumen. Se presenta una propuesta de acondicionamiento térmico de un biodigestor a escala de laboratorio con sustancias orgánicas que presenten cambio de fase sólido – líquido a la temperatura de operación del mismo. El tanque se encuentra en el interior de un invernadero, expuesto a la radiación solar diurna. Se han analizado dos tamaños de biodigestor y tres espesores de sustancia de cambio de fase. Los resultados muestran que dichas sustancias pueden contribuir a moderar las oscilaciones térmicas día – noche, mejorando las condiciones ambientales necesarias para que se produzca la biodigestión.

1 INTRODUCCION

En el proceso de digestión anaeróbica, las bacterias productoras de metano contenidas en el sustrato en el interior de un digestor, son sumamente sensibles a los cambios de temperatura, siendo por ello, necesario el mantenimiento de las condiciones requeridas para la producción de biogás. Existen dos rangos definidos en que las bacterias presentan una buena producción de biogás: la mesófila, entre 30 y 40°C y la termófila entre 45 y 60°C (Pfeffer, 1974; Ten Brummeler, 1993; Verma, 2002). La mayor parte de los biodigestores funcionan dentro de los límites de las temperaturas mesófilas, produciéndose la digestión óptima a los 35°C aproximadamente. En los meses de invierno la temperatura ambiente es menor a ésta, por lo que es necesario acondicionar el lugar donde será emplazado el biodigestor; por ello, se lo ha resguardado en un recinto de tipo invernadero, hecho que no necesariamente asegura contar con las temperaturas externas adecuadas, en razón de lo cual se propone la utilización de sustancias de cambio de fase, que contribuyan a lograr la temperatura necesaria para su funcionamiento.

El uso de sustancias de cambio de fase utilizadas como acumuladores y moderadores de temperatura ha sido propuesto por varios autores para distintos fines (Hasan y Sayigh, 1994, Feldman, et al. 1995, Farid et al, 2004) y presenta ciertas ventajas respecto a las formas tradicionales de acumulación. Estas sustancias permiten la acumulación de energía no solo en forma sensible, sino también como calor latente y debido a su alta capacidad calorífica y calor latente de fusión no es necesario grandes volúmenes de material

Se propone que el recipiente que contiene la biomasa se encuentre rodeado por una capa de material de cambio de fase, en forma de camisa, estando el conjunto en el interior de un recinto tipo invernadero para aumentar la acumulación de calor y asegurar el resguardo a los efectos del viento; el que se puede cubrirse durante la noche a fin de evitar pérdidas innecesarias de calor hacia el exterior. Se coloca una placa reflectora próxima a la superficie no iluminada por el sol a los efectos de uniformizar el flujo de calor que recibe el invernadero a través de su superficie lateral. Un esquema del conjunto se muestra en la Figura 1.

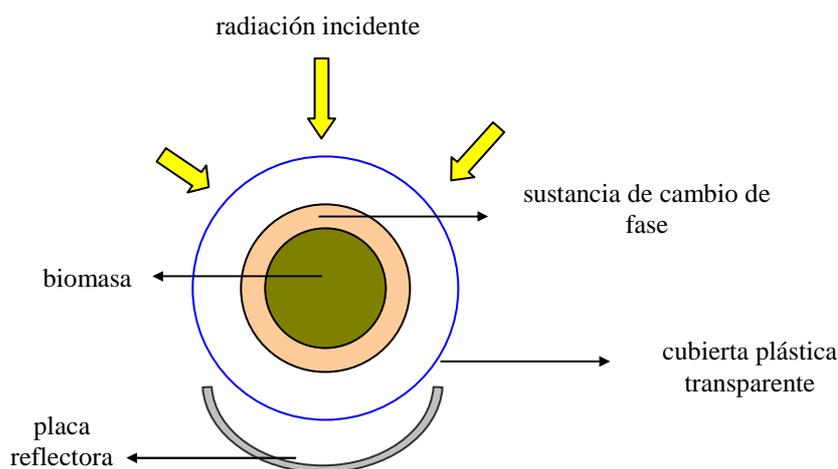


Figura 1: Esquema del digestor, el material de cambio de fase, en el interior del invernadero y la placa reflectora.

Asumiendo que la placa reflectora cumple con el propósito antedicho, el problema presenta simetría; por tanto se estudia la distribución de temperaturas en la biomasa y en la sustancia de cambio de fase, solo en la dirección radial en función del tiempo.

Con el propósito de evaluar la distribución de temperaturas en la sustancia de cambio de

fase y la biomasa contenida en el biodigestor se realiza un modelo de simulación numérica que determina el comportamiento térmico del conjunto: biodigestor y sustancia de cambio de fase cuando se encuentra sometido a las condiciones ambientales registradas en la ciudad de Salta.

2 FORMULACION MATEMATICA

El objetivo del problema es evaluar el la distribución de temperaturas en el material de cambio de fase y en la biomasa

Para hacerlo en el material de cambio de fase, es necesario evaluar conjuntamente el avance del frente de fusión desde la superficie externa y la distribución de temperaturas en las fases líquida y sólida. Para ello, se utiliza el modelo entálpico el que, considerando la coordenada radial r y el tiempo t ; sujeta a las correspondientes condiciones iniciales y de borde, calcula precisamente la entalpía $h(r,t)$ obteniendo, con ella la temperatura $T(r,t)$ y la fracción de líquido presente $\lambda(t)$, calculando con esta última la posición de la interfase $s(t)$. (Zerroukat y Chatwin, 1994)

Designando con k a la conductividad térmica de la sustancia de cambio de fase, con ρ a la densidad, con c al calor específico y con L al calor latente de fusión, el problema matemático resulta descrito por el sistema de ecuaciones (1) a (6), siendo $q(r,t) = -k \nabla(r,t)$ el calor transferido en el interior del material. Asimismo los subíndices s y l identifican los estados sólido y líquido, respectivamente. Aunque por ser un cambio de fase de primer orden, se producen variaciones en el volumen, éstas son pequeñas por lo que la densidad ρ se asume igual en ambas fases, tal como se presenta en bibliografía, ya que considerarlos solo aporta dificultad matemática sin mejorar sensiblemente los resultados. (Alexiades y Solomon, 1993) Asimismo las grasas orgánicas son lo suficientemente viscosas para que no se produzcan efectos apreciables de movimiento en el líquido. (Swern, 1964)

$$\frac{\partial h(r,t)}{\partial t} + \text{div}[q(r,t)] = 0 \quad t > 0 \quad (1)$$

$$T(r,t) = \begin{cases} T_f + \frac{h(r,t)}{\rho c_s} & h(r,t) \leq 0 \quad \text{sólido} \\ T_f & 0 < h(r,t) < \rho L \quad \text{interface} \\ T_f + \frac{h(r,t) - \rho L}{\rho c_l} & h(r,t) \geq \rho L \quad \text{líquido} \end{cases} \quad \forall t > 0 \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{h(r,t)}{\rho L} \quad \forall t > 0 \quad (3)$$

$$h(r,0) < 0, \quad T(r,0) = T_a < T_f, \quad \lambda(r,0) = 0, \quad \forall r > 0, \quad (4)$$

$$T(R_1, t) = T_1 \quad T(R_2, t) = T_2 \quad (5)$$

$$\lambda(r,0) = 0 \quad (6)$$

Es de hacer notar que la ecuación (3) se tiene solo dependencia temporal, dado que la fracción de líquido es una función del tiempo t .

Para el cálculo de la distribución de temperaturas en la biomasa se utiliza el modelo difusivo, los parámetros térmicos empleados se midieron experimentalmente, considerando que ésta es una mezcla uniforme de agua y estiércol, tal como se utiliza tradicionalmente a nivel rural. Las ecuaciones (7) a (9) explicitan dicho modelo, los parámetros térmicos han sido designados con la misma letra identificándolos como primados. (Bejan, 1993) Asimismo, la (9) expresa la continuidad en la temperatura entre la pared del tanque con biomasa y la de cambio de fase que la recubre.

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \alpha' \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = \alpha' \left[\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] \quad t > 0 \quad (7)$$

$$T(r,0) = T_a \quad \forall r > 0, \quad (8)$$

$$T(R_1, t) = T_1 \quad (9)$$

3 RESOLUCION NUMERICA

Se analiza el comportamiento térmico de la sustancia de cambio de fase conjuntamente con la biomasa contenida dentro del digestor cuando la superficie externa de la sustancia de cambio de fase se somete a la condición de borde en función del tiempo presentada en la Figura 2. Los valores corresponden a la temperatura dada dentro del invernadero en un día de invierno en la ciudad de Salta, el que ha sido cubierto durante la noche para evitar pérdidas innecesarias de calor y con ello la excesiva disminución de la temperatura en su interior, en ella se muestran los registros medidos y la curva de ajuste, utilizada en el cálculo.

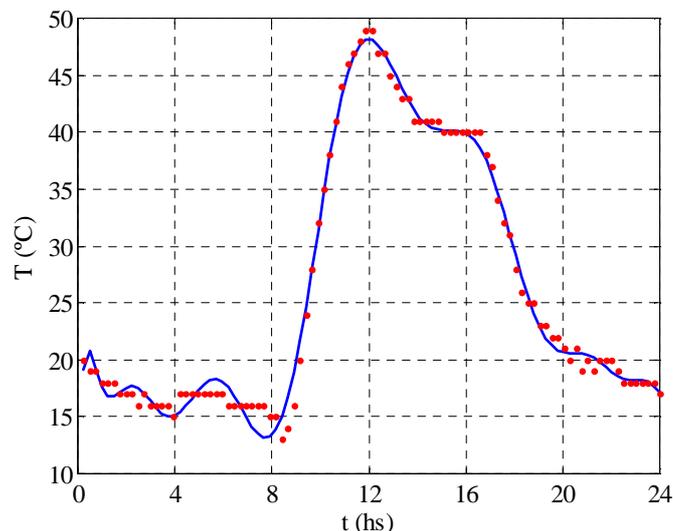


Figura 2: Temperaturas en el interior del invernadero.

Para la resolución numérica del problema se ha realizado un modelo de simulación en Matlab, que permite calcular la entalpía en la sustancia de cambio de fase y con ella la distribución de temperaturas y la fracción de sustancia líquida en función del tiempo, obteniendo a partir de esta última la posición de la interfase en función del tiempo. A su vez en el interior del biodigestor se evalúa la temperatura utilizando las ecuaciones de difusión.

A los efectos del cálculo las ecuaciones anteriores (1) a (9), deben ser convenientemente discretizadas, aunque es de notar que esto resulta trivial para las (2) a (6) y las (8) a (9), por lo que se realiza este proceso sólo para las ecuaciones (1) y (7). Denotando con i , el índice de la variable x , con j el de la variable t , con Δx y Δt los intervalos espacial y temporal, respectivamente, las expresiones resultantes se expresan en las ecuaciones (10) y (11).

$$\frac{h(i, j+1) - h(i, j)}{\Delta t} - k \left[\frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{i \cdot \Delta r} \frac{T(i, j) - T(i-1, j)}{\Delta r} \right] = 0 \quad t > 0 \quad (10)$$

$$\frac{T(i, j+1) - T(i, j)}{\Delta t} = \alpha' \left[\frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{i \cdot \Delta r} \frac{T(i, j) - T(i-1, j)}{\Delta r} \right] \quad t > 0 \quad (11)$$

Para el cálculo se tomaron los valores de los parámetros térmicos típicos de estearatos de ácidos grasos: $\rho = 778 \text{ kg/m}^3$, $k_s = 0.15 \text{ W/m K}$, $k_l = 0.22 \text{ W/m K}$, $c_s = 2380 \text{ J/kg K}$, $c_l = 2880 \text{ J/kg K}$ y $L = 213 \text{ kJ/kg}$, (Swern, 1964, Hasan y Sayigh, 1994)

Dado que se desea mantener la temperatura del digestor alrededor de los 35°C se ha tomado este valor para la temperatura de fusión. Cabe destacar que este parámetro puede seleccionarse a voluntad dentro de cierto rango, ya que las sustancias de cambio de fase pueden combinarse entre sí o bien, cambiarse su punto de fusión por el agregado de excipientes. (Domínguez et al, 2001)

Los parámetros térmicos medidos en la biomasa son: $k' = 0.67 \text{ W/m K}$, $\rho' = 768 \text{ kg/m}^3$, $c' = 3058 \text{ J/kg K}$, siendo $\alpha' = k' / (\rho' c') = 2.86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ la difusividad térmica.

4 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANALISIS DE LOS MISMOS.

Se han tomado dos radios de biodigestor: 20 y 30 cm y tres espesores de material de cambio de fase: 2, 4 y 6 cm, para cada uno de ellos. En todos los casos el conjunto biodigestor y material de cambio de fase se encuentra en el interior de un invernadero en las condiciones antedichas. En las Figuras 3 a 8, se presenta los resultados obtenidos para todas las situaciones planteadas. El cálculo tiene una duración de 10 días, a fin de observar el comportamiento durante el período necesario para obtener una producción significativa de biogas.

Los resultados obtenidos para el digestor de 20 cm de radio se presentan en la Figura 3, en ella se observa las oscilaciones de la temperatura en el centro del digestor para los distintos espesores de sustancia de cambio de fase, conjuntamente con la condición de borde aplicada a la superficie externa del contenedor. Se señala en color azul la condición de borde a la que esta expuesta la superficie exterior del sistema completo, las demás curvas representan la distribución de temperaturas en el centro del biodigestor, es decir para $r=0$.

En la Figura 4 se muestra con más detalle las oscilaciones para los distintos casos en los tres días finales del cálculo. Se observa que las temperaturas medias no distan mucho entre si, de manera que para los espesores elegidos las condiciones de temperatura logradas no presentan un cambio considerable.

En ambas figuras se aprecia como, a medida que el espesor del material de cambio de fase de aumenta lo hacen las temperaturas en su interior, con máximos próximos a los 30°C , observándose un corrimiento en la posición de los mismos en el tiempo, lo que indica que el material de cambio de fases actúa efectivamente como moderador de temperatura.

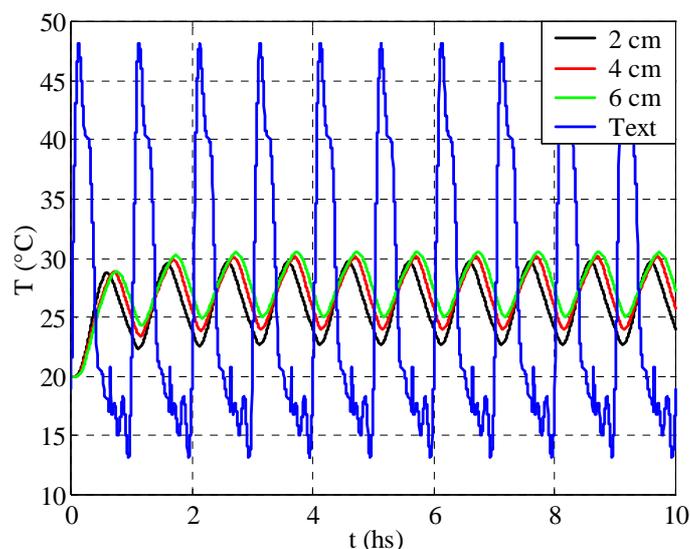


Figura 3: Temperaturas en el centro del biodigestor para 20 cm de radio.

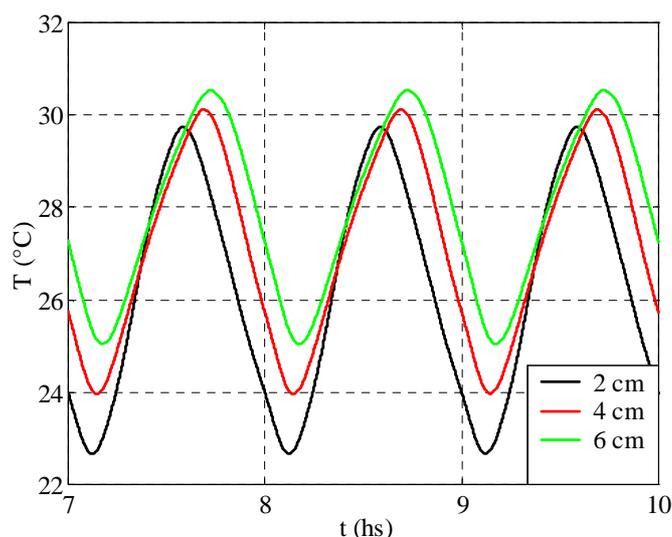


Figura 4: Detalle de temperaturas en el interior del biodigestor de 20 cm de radio.

En la [Figura 5](#) se presentan los resultados del cálculo tomando un espesor de material de cambio de fase de 2, 4 y 6 cm para un digestor de 30 cm de radio, para cada caso, se calcula también, la distribución de temperaturas en la biomasa y en la sustancia de cambio de fase, utilizando para graficarlos el mismo código de colores que en las figuras anteriores.

También para este caso se presentan con mayor detalle en la [Figura 6](#) las oscilaciones de la temperatura para cada espesor. Se observa como la temperatura interna se eleva con el aumento del espesor.

Las temperaturas en el biodigestor aumentan para los distintos casos, conforme crece el espesor del material de cambio de fase, estando éstas muy próximas entre si, las temperaturas medias son aproximadamente de 26, 27 y 28°C para los espesores de 2, 4 y 6cm respectivamente.

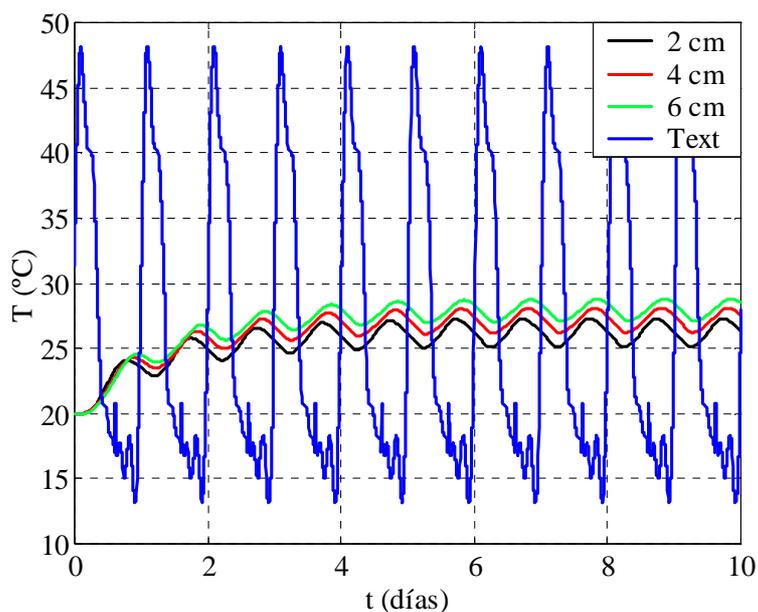


Figura 5: Temperaturas en el biodigestor de radio 30 cm

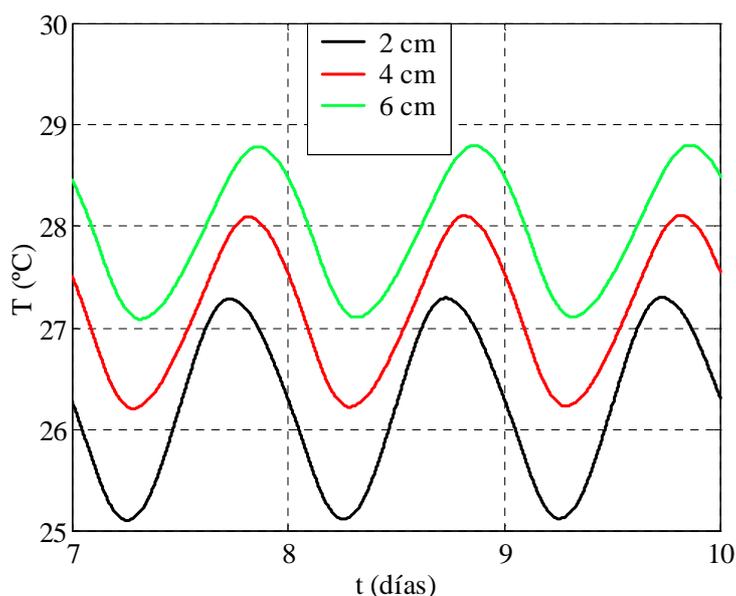


Figura 6: Detalle de temperaturas en el interior del biodigestor de 30 cm de radio

De la comparación de ambas situaciones (distintos radios de tanque) puede verse la importancia del tamaño del digestor en la distribución de temperatura, a medida que éste aumenta las oscilaciones van atenuándose esto es así dado que se cuenta con más masa térmica donde la energía se puede acumular en forma de calor.

Asimismo, la sustancia de cambio de fase contribuye a la acumulación de calor tanto en forma sensible como latente, moderando las temperaturas en el interior del tanque a utilizar para la producción de gas; a la vez que pone un límite a la temperatura superior en la superficie lateral del biodigestor, dado por su temperatura de fusión.

En efecto, en la [Figura 7](#) se presenta la distribución de temperaturas para el digestor de 30 cm de radio con un espesor de material de cambio de fase de 6 cm, donde se muestra la temperatura en el centro del digestor y a los 10, 20 y 30 cm del mismo, esta última coincide

con la superficie externa del digester que colinda con la sustancia de cambio de fase. Se observa claramente como la sustancia de cambio de fase, alcanza su punto de fusión, manteniendo esta temperatura en buena parte del proceso, lo que indica que no se ha fundido completamente por lo que actúa como una cota superior de la temperatura del biodigestor.

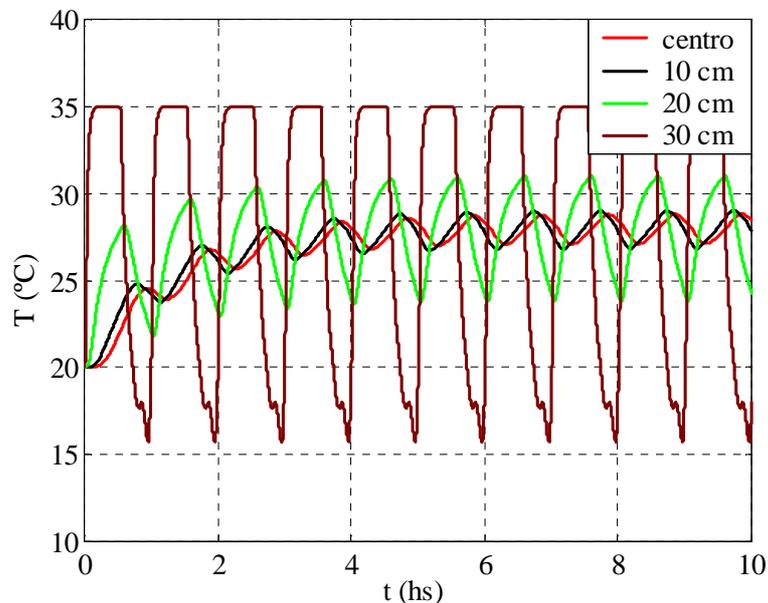


Figura 7: Temperatura en el interior del biodigestor de 30 cm de radio y 6 cm de material de cambio de fase

Comparando las Figuras 4 y 6, se observa que para el digester de 20 cm de radio, la temperatura en su interior presenta una amplitud térmica entre 5 y 6 °C, mientras que para el de 30 cm de radio ésta se reduce a unos 2 °C, lo que pone de manifiesto la importancia del tamaño del biodigestor a la hora de mantener la temperatura tan constante como sea posible en su interior. Asimismo la presencia del material de cambio de fase, contribuye a moderar las oscilaciones de la temperatura externa, manteniéndola en rangos aceptables para el proceso de biodigestión.

Se aprecia también, la importancia de la elección de la sustancia de cambio de fase, tanto en sus parámetros térmicos, como en especial en su temperatura de fusión, ya que ésta, al no fundirse completamente, limita la temperatura que alcanzará el biodigestor.

5 CONCLUSIONES

El modelo de cálculo resulta confiable y permite obtener rápidamente el perfil de temperaturas en todo el radio del biodigestor, admite cualquier condición de temperatura externa y la elección del tamaño del tanque y del espesor del material de cambio de fase. La versatilidad del lenguaje facilita además, la rápida visualización de los resultados.

La utilización de materiales de cambio de fase constituye una alternativa interesante en el acondicionamiento térmico del reactor, ya que contribuye a mantener acotada su temperatura en rangos cercanos a la del proceso de digestión. En casos en que sea necesaria elevar las temperaturas, condición que puede darse por un día de poca radiación se podrá utilizar energía auxiliar, la que puede provenir de otro dispositivo solar tal como acumuladores de piedra, colectores de aire o energía fotovoltaica para calentamiento eléctrico.

El material de cambio de fase contribuye también a moderar las oscilaciones térmicas día –

noche, observándose un mejor comportamiento conforme aumenta el tamaño del digestor, ya que se tendrá mayor masa donde acumular energía. No obstante ello, no debe perderse de vista que, esta propuesta es para acondicionar digestores a pequeña escala, ya que si se piensa en grandes tamaños es necesario utilizar otras técnicas para mantener la temperatura en su interior, tales como el enterrado del tanque.

6 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación N° 1554 del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, a quien se agradece su financiamiento.

7 REFERENCIAS

- Alexiades, V y Solomon, A. *Mathematical Modeling of Melting or Freezing Processes. Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group*, 1993.
- Bejan, A. *Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc.* Canadá, 1993
- Domínguez, M; Culubret, J; Mascheroni, R; López, P; Pinillos, J y García, C. La acumulación de energía con cambio de fase a temperaturas positivas en instalaciones de climatización *Actas del VI Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración*, N° 45, pp. 649-657, 2001.
- Farid, M; Khudhair, A; Razack, S; Al-Hallaj, S. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management* N° 45, pp. 1597 – 1615, 2004.
- Feldman, D; Banu, D y Hawes, D. Low Chain Esters of Stearic Acid as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Building. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. N° 36, pp. 311 – 322, 1995.
- Hasan, A y Sayigh, A, Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76, 1994
- Pera A., Vallini G., Frassinetti S., Cecchi F. Co-composting for managing effluente from thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Environment Technology*, Vol. 12 pp 1137-1145, 1991.
- Pfeffer, J. Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse. *Biotechnology and Bioengineering*. N° 16, 771-787, 1974.
- Swern, D. Physical Properties of Fats and Fatty Acids Cap. 3 *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 1964.
- 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.
- Zerroukat, M y Chatwin, C. Computational Moving Boundary Problems. *Research Studies Press LTD. John Wiley & Sons. England*, 1994.