

DISEÑO DE BIODIGESTORES
CALEFACCIONADOS MEDIANTE
ENERGIA SOLAR

Alejandro Mermet *, Selva Ugarte #.

Consejo de Investigaciones de la
Universidad Nacional de Cuyo - (CIUNC)
Facultad de Ingeniería - UNC.
Centro Universitario - Parque Gral. San Martín
Casilla de Correos 405 - 5500 Mendoza.

RESUMEN

La digestión anaeróbica es uno de los procesos que posee mayores perspectivas de futuro como fuente de energía, además de dar soluciones a problemas de contaminación del ambiente.

De los parámetros que intervienen en este proceso, la temperatura es el más importante. En Regiones como la de Cuyo, con bajas temperaturas invernales, se hace necesario el calentamiento de la masa en digestión. Por otro lado, los niveles de radiación son aptos para pensar en su utilización como fuente de energía calórica.

En este trabajo se propone un método de diseño simple, para el dimensionamiento de las áreas de un biodigestor con aporte solar, tomando como datos de partida, el volumen de masa a digerir, los materiales a emplearse y algunos parámetros climáticos. Los resultados de la simulación detallada del modelo que representa al sistema, han mostrado niveles de temperatura aceptables.

INTRODUCCION

La conversión energética de la biomasa puede realizarse mediante procesos termoquímicos (combustión, pirólisis, gasificación), o bioquímicos (digestión anaeróbica, transformación hidrolítica y fermentación para la obtención de alcohol).

De estos procesos, la digestión anaeróbica es uno de los que posee mayores perspectivas energéticas y sanitarias, pudiendo ayudar a la resolución de diferentes problemas a nivel rural o urbano.

Las condiciones para el desarrollo de la biodigestión, son: medio anaeróbico (carente de oxígeno), húmedo (>50%) y ligeramente alcalino; el rango de temperaturas en que se desarrolla la flora bacteriana que metaboliza la materia orgánica produciendo metano, va de los 5°C a los 60°C.

* Becario del Consejo de Investigaciones de la UNC.

Este trabajo fué realizado como tema de investigación bajo el sistema de becas del CIUNC.

Profesora Titular Facultad de Ingeniería, UNC. Directora Proyectos de Investigación.

En climas desfavorables, lograr y mantener una temperatura óptima y constante representa un problema importante. Por otro lado, la energía solar constituye un recurso energético muy abundante y poco usado, que es fácilmente aprovechable con la utilización de tecnologías sencillas y de bajo costo y puede constituir una alternativa útil en el calentamiento de biodigestores.

El objetivo principal de este trabajo, es presentar alternativas válidas en el desarrollo y utilización de nuevas fuentes de energía.

DIGESTION ANAEROBICA. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y FORMAS DE CALENTAMIENTO.

La digestión anaeróbica es un conjunto de procesos biológicos, mediante los cuales sustancias orgánicas pueden ser digeridas en un ambiente sin oxígeno, produciéndose gases combustibles y barros digeridos útiles como acondicionadores de suelos. Estos procesos, debidos a la acción de una flora bacteriana, transforman los compuestos orgánicos en metano y dióxido de carbono utilizando enzimas como catalizadores.

Se pueden clasificar distintas familias de bacterias, según el intervalo de temperaturas en el que actúan. Entre los 25°C y los 40°C se desarrollan las mesófilas, entre 40°C y 60°C las termófilas. La duración de la digestión varía en forma inversa a la temperatura, hasta llegar a un mínimo, de 35°C para las mesófilas con un máximo de producción gaseosa en los primeros 10 a 15 días, luego aumenta hasta detener su actividad. A los 40°C las bacterias mesófilas son substituidas por las termófilas, estas acortan aún más la duración de la biodigestión, hasta llegar a un mínimo de tiempo en su temperatura óptima a los 55°C, para luego aumentar con la temperatura, hasta cesar en su actividad a los 60°C.

Es un proceso que no genera una cantidad apreciable de calor, por lo que las temperaturas requeridas deben lograrse con aportes de calor externos.

Para digestión de aguas servidas se observa que, incrementos de la temperatura de 5°C, a partir de 10°C hasta los 25°C, producen aumentos en la producción de biogás de alrededor del 16%, en cada escalón; mientras que de 25°C a 30°C sólo aumenta el 7%. Esto es muy significativo, respecto al calentamiento de la masa en proceso desde el punto de vista energético, pues indica que se tiene un límite, a partir del cual, para obtener un incremento en la generación de biogás se va a consumir mas combustible (o su equivalente energético), que el incremento en la producción.

Es imprescindible no perder de vista el balance entre el equivalente energético del biogas producido y la energía suministrada para mantener la temperatura en el interior del digestor.

Por lo que, aún si la producción de biogás aumenta con la temperatura, no siempre es preferible trabajar a temperaturas que favorezcan el desarrollo de bacterias termofílicas, optándose por temperaturas moderadas, aptas para el desarrollo de bacterias mesofílicas, ya que las primeras son muy sensibles a los cambios de temperatura. Además, se torna difícil mantener temperaturas estables por sobre los 50°C.

En los casos en que el calentamiento es necesario, si se utilizara parte del biogás para ello, la temperatura óptima, desde el punto de vista energético, puede no coincidir con la temperatura óptima de fermentación. En el primer caso, la temperatura óptima será la que deje más gas disponible en el balance gas producido - gas consumido para mantener la temperatura del biodigestor. En el segundo caso, será la que, a igualdad de tiempo, produzca mayor cantidad de biogás o reduzca más la materia orgánica al final del proceso.

Existen formas de calentamiento que no implican ningún gasto energético propio, como la utilización del calor residual, la fermentación aerobia o la energía solar. Los otros métodos implican el consumo de algún combustible, con el fin de obtener calor para producir más combustible. De allí que se deba llegar a un punto de equilibrio, considerando el aumento de producción al calentar, y la justificación tanto económica como energética.

EVALUACION DE SISTEMAS SOLARES

Con el objeto de aprovechar la energía solar para el calentamiento de un líquido albergado dentro de un biodigestor, se puede pensar en sistemas activos de calentamiento de agua, por los cuales circula un líquido que transfiere el calor a la masa en digestión, mediante intercambiadores de calor. Este tipo de sistemas tiene sentido sólo para instalaciones de gran magnitud y complejidad, dado su costo. En cuyo caso tal vez sea más conveniente tener en cuenta sistemas de calentamiento que utilicen parte del mismo gas producido.

Para pequeñas instalaciones, de bajo costo y fácil construcción y mantenimiento, es más razonable pensar en la utilización de sistemas solares pasivos.

El agua es una sustancia muy apta para el almacenamiento y transporte de energía calórica, debido a su capacidad calorífica y densidad. Si pensamos en un biodigestor, como en un recipiente con un contenido de agua de 80%, se puede pensar en usar la energía solar directamente para calentarlo, y utilizar su propio contenido para almacenar el calor.

Además se pueden utilizar algunas ideas en las que se basan los sistemas pasivos para el calefaccionamiento de edificios, como los muros colectores/acumuladores, ya que la masa que constituye el muro va acumulando y cediendo calor, lo que atenúa los saltos térmicos Día/Noche, y aún los estacionales Invierno/Verano.

Para el dimensionamiento del área colectora en el diseño de un sistema solar, se puede partir de un estudio de las pérdidas de calor a través de la periferia del volumen a calentar, desde su interior hacia el medio ambiente, y de las ganancias de energía a través del área colectora, así como de la energía acumulada.

Este estudio se puede llevar a cabo en forma detallada, haciendo los balances térmico/energéticos para todos los instantes del día, mediante una simulación computacional. O se puede realizar un cálculo rápido, planteando balances globales, partiendo de datos en promedio diario, para tener una idea de la situación. Estos balances energéticos son de la forma:

Energía acumulada = Energía ganada - Energía perdida.

Una primera aproximación se obtiene partiendo de un balance de la forma: Energía ganada = Energía perdida, donde la energía ganada es función del área de colección y de la eficiencia del sistema. Partiendo de datos globales en promedio diario, se puede evaluar el recurso solar para distintos días característicos de los meses del año, estimar el tamaño de la superficie colectora, y determinar en qué medida se satisfacen las pérdidas térmicas.

Individualizando la superficie de colección de la radiación solar como área colectora (A_c); el resto de las áreas expuestas que no colectan energía solar, se denominará área global de pérdida (A_g). Es posible independizarse de la forma geométrica del sistema (reactor), pues en las ecuaciones obtenidas a partir del balance energético, sólo intervienen el área colectora A_c y el área de pérdida A_g . En el cálculo de estas áreas se ven involucrados los factores geométricos, pero a los fines de las consideraciones térmicas, sólo es necesario conocer la magnitud de las áreas.

Partiendo de un área de colección calculada en base a un balance global, se realiza un diseño con una relación A_c/A_g favorable y se somete a una simulación detallada el modelo matemático que representa al sistema, para evaluar el comportamiento térmico del mismo.

La energía ganada puede calcularse mediante la ecuación :

$$Q_u = n \cdot A_c \cdot \text{Rad}$$

donde Q_u es el calor útil, n la eficiencia de conversión de la energía solar en energía térmica aprovechable, A_c la superficie de colección y Rad la radiación solar incidente.

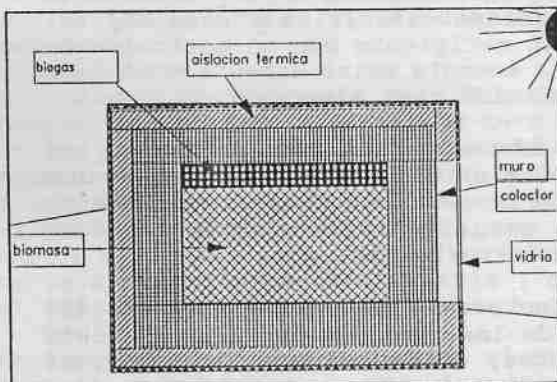


Fig. 1. Biodigestor con Aporte Solar. Vista esquemática lateral.

Las pérdidas de calor (L), a través de la envolvente, se calculan teniendo en cuenta las distintas capas de materiales que la componen, los films convectivos y pérdida de calor debida al agregado de líquido frío y extracción de parte del fluido caliente.

DISEÑO DE BIODIGESTORES CON APORTE SOLAR PASIVO

El dimensionamiento del sistema de calentamiento, debe hacerse a partir del cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes del reactor, y de la energía necesaria para calentar los líquidos de entrada. Pensando en una geometría sencilla, se eligen biodigestores continuos de desplazamiento, de desarrollo horizontal, en los cuales la carga fresca ingresa por un extremo y se evacua la materia agotada por el otro. Su forma de prisma, con sección rectangular o cilíndrica, permite ubicarlo cómodamente ya sea en

superficie o semienterrados (a diferencia de los tradicionales diseños chinos o hindúes que son subterráneos), con taludes de tierra para protegerlos de las inclemencias climáticas.

Una de las caras del prisma estará expuesta a la radiación solar, aislada del ambiente externo por un vidrio o una película de polietileno transparente. Las restantes paredes estarán aisladas térmicamente, para disminuir las pérdidas de calor.

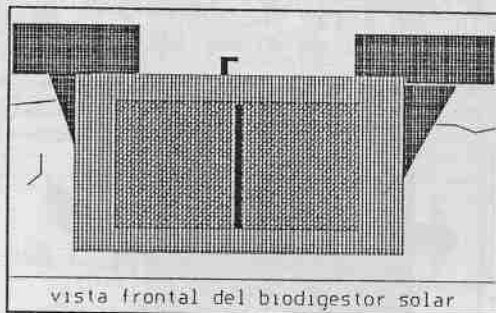


Fig. 2.

Es posible establecer una relación entre las áreas de pérdida y la superficie colectora, llegando a un valor crítico del área colectora, debajo del cual la energía absorbida es insuficiente para contrarrestar las pérdidas.

Por otro lado, en digestores continuos las relaciones de longitud oscilan entre 3 a 8 diámetros o anchos, siendo 5 el valor óptimo. La altura se relaciona con el ancho por un factor 0.8. El límite de volumen para este tipo de reactores es de 12 metros cúbicos. Estos valores obtenidos de bibliografía, han surgido de la experiencia, y se fundamentan en el hecho de que si el digestor es muy largo y angosto la carga fresca no se contaminaría adecuadamente, y si fuera corto y ancho sería difícil conseguir una distribución uniforme de la materia de entrada.

En cuanto a las relaciones entre las aristas del prisma se encontró que: $0.24 < A_c/A_p < 0.266$, donde A_c es el área colectora y A_g es el área de pérdidas.

Asumiendo que la energía absorbida debe ser por lo menos igual a la perdida, tomando valores en promedio diario para un mes, se puede obtener: $Q_u \geq L$. Donde Q_u es la energía útil absorbida en promedio diario y L es la energía perdida a lo largo del día.

Si $Q_u = n \cdot \text{Rad} \cdot A_c$ y $L = U_g \cdot A_g \cdot DT$; entonces:

$n \cdot \text{Rad} \cdot A_c = U_g \cdot A_g \cdot DT$ luego:

$A_c/A_p \geq 1 / [(n \cdot \text{Rad}/DT - U_c) / U_p]$

Donde:

n : eficiencia del sistema solar.

A_c : área colectora.

A_p : área de pérdidas.

$U_g \cdot A_g = A_p \cdot U_p + A_c \cdot U_c$: coeficiente global de pérdidas.

DT : diferencia entre las temperaturas medias interna y externa.

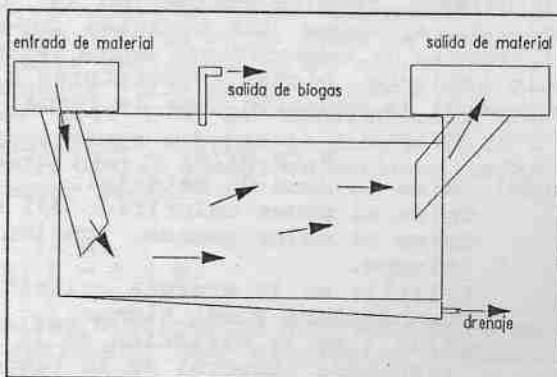


Fig. 3. Biodigestor de Desplazamiento.

El coeficiente U_c es la transmitancia del calor a través del muro vidriado y U_p la transmitancia de las superficies de pérdidas

debidamente aisladas. Se puede notar que las relaciones entre las áreas se calculan en base a los parámetros térmicos de los materiales, a la radiación solar incidente y al salto de temperaturas entre el ambiente y el líquido en digestión.

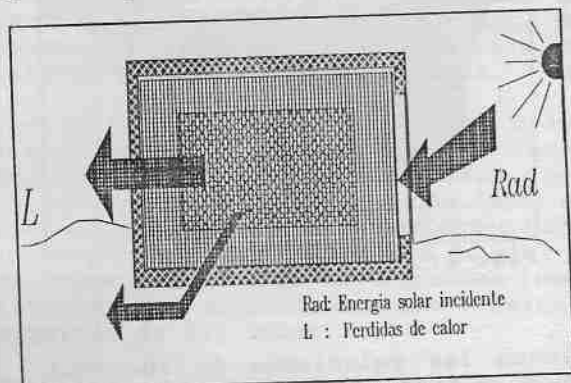


Fig. 4. Balance Energético.

redes del digestor y en el propio líquido. Teniendo en cuenta este fenómeno, aparecería otro término en el balance de energía lo cual se puede solucionar aumentando en un cierto porcentaje la eficiencia del sistema. Para hacer ésto es necesario evaluar el comportamiento térmico del sistema a través de modelos teóricos y convalidarlos con mediciones obtenidas de modelos reales.

MODELO TEORICO. REPRESENTACION MATEMATICA DEL PROBLEMA FISICO.

Del balance térmico/energético de un cuerpo material a una dada temperatura, surge una ecuación cuyos términos son función de las diferencias de temperaturas entre las distintas partes del cuerpo y el medio ambiente. Dichas temperaturas a su vez son función del tiempo. En general la ecuación toma la forma:

$$M \cdot C_p \cdot dT/d\tau = \Sigma Q_u(T(\tau)) - \Sigma L(T(\tau))$$

Donde: M: es la masa de material.

C_p: es el poder calorífico del material.

Q_u: es el calor ganado, función de la temperatura y del tiempo.

L(T(τ)): es la energía calórica perdida función de la temperatura y del tiempo.

dT/dτ : es la variación de la temperatura en el tiempo (derivada temporal de la temperatura).

Para un sistema, se plantean balances energéticos entre las distintas partes del mismo a diferentes temperaturas. Obteniéndose así un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, cuya solución describe la distribución de temperaturas en el sistema estudiado.

Una simulación detallada, surge a partir de la resolución numérica del problema, calculando la solución de cada ecuación para cada instante de tiempo, de modo de apreciar la evolución de las temperaturas en el tiempo, calculando los parámetros instantáneamente.

Las medidas de las aristas del paralelepípedo se calculan a partir del área colectora, donde:

$$A_c = (x \cdot 0.8)^{1/3} \cdot V^{2/3}$$

$$x = 1.6 / (A_p / A_c \cdot 0.8 - 2.8)$$

Luego:

el ancho o espesor:

$$A = [A_c / (x \cdot 0.8)]^{1/2};$$

el largo es: B = x * A ;

el alto es: H = 0.8 * A ;

En los cálculos anteriores no se tomaron en cuenta los términos de energía acumulada en las pa-

des del digestor y en el propio líquido. Teniendo en cuenta este fenómeno, aparecería otro término en el balance de energía lo cual se puede solucionar aumentando en un cierto porcentaje la eficiencia del sistema. Para hacer ésto es necesario evaluar el comportamiento térmico del sistema a través de modelos teóricos y convalidarlos con mediciones obtenidas de modelos reales.

redes del digestor y en el propio líquido. Teniendo en cuenta este fenómeno, aparecería otro término en el balance de energía lo cual se puede solucionar aumentando en un cierto porcentaje la eficiencia del sistema. Para hacer ésto es necesario evaluar el comportamiento térmico del sistema a través de modelos teóricos y convalidarlos con mediciones obtenidas de modelos reales.

MODELO TEORICO. REPRESENTACION MATEMATICA DEL PROBLEMA FISICO.

Del balance térmico/energético de un cuerpo material a una dada temperatura, surge una ecuación cuyos términos son función de las diferencias de temperaturas entre las distintas partes del cuerpo y el medio ambiente. Dichas temperaturas a su vez son función del tiempo. En general la ecuación toma la forma:

$$M \cdot C_p \cdot dT/d\tau = \Sigma Q_u(T(\tau)) - \Sigma L(T(\tau))$$

Donde: M: es la masa de material.

C_p: es el poder calorífico del material.

Q_u: es el calor ganado, función de la temperatura y del tiempo.

L(T(τ)): es la energía calórica perdida función de la temperatura y del tiempo.

dT/dτ : es la variación de la temperatura en el tiempo (derivada temporal de la temperatura).

Para un sistema, se plantean balances energéticos entre las distintas partes del mismo a diferentes temperaturas. Obteniéndose así un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, cuya solución describe la distribución de temperaturas en el sistema estudiado.

Una simulación detallada, surge a partir de la resolución numérica del problema, calculando la solución de cada ecuación para cada instante de tiempo, de modo de apreciar la evolución de las temperaturas en el tiempo, calculando los parámetros instantáneamente.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL MODELO

Si se considera al biodigestor como un recipiente de hormigón o ladrillos, en forma de paralelepípedo rectangular, con una cara expuesta al sol y las cinco restantes aisladas térmicamente, se puede hacer una distribución de nodos sencilla, considerando al muro colector de radiación como una sucesión de superficies isoterma, y considerando el líquido como una masa de temperatura homogénea.

Escribiendo los balances, como diferencias finitas en la forma explícita se puede llegar a un sistema sencillo. Para la resolución del mismo, se confeccionó un programa computacional, en lenguaje TURBO-PASCAL versión 6.0, el cual a partir de datos geométricos y parámetros generales de problema, somete al modelo a cálculos reiterados, notándose una rápida convergencia de las soluciones. Este programa genera archivos de datos, que luego son visualizados mediante gráficos de Temperatura vs. Tiempo.

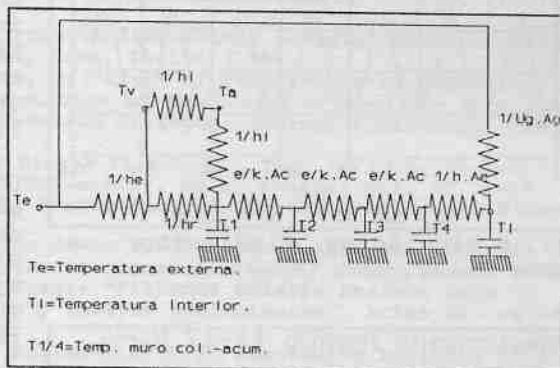


Fig. 5. Distribución Nodal.

Las simulaciones, se realizaron para una sucesión de 7 días consecutivos, con características climáticas iguales al promedio mensual, y suponiendo que el biodigestor funciona en forma discontinua, es decir con una carga única de material.

Por ejemplo, haciendo uso de las ecuaciones antes expuestas, se considera el caso de un biodigestor que alberga en su interior 1 metro cúbico de materia prima. Los materiales empleados en su construcción son muros de ladrillo de 15 cm de espesor y 2.5 cm de aislante, con un coeficiente global de pérdidas de 1.49 W/m²°C. Considerando una eficiencia térmica del 35% y una temperatura interna de diseño de 30°C para condiciones climáticas de promedio diario anual, se obtiene, Ac/AP = 0.27. Las dimensiones del biodigestor serán:

$$\begin{aligned} A_c &= 1.96 \text{ m}^2; A_p = 7.22 \text{ m}^2 \\ A &= 0.5 \text{ m}; B = 4.9 \text{ m}; H = 0.4 \text{ m}. \end{aligned}$$

Por otro lado, si se considera el mismo biodigestor pero estimando un rendimiento térmico del 45%, se obtienen las siguientes medidas óptimas:

$$\begin{aligned} A_c &= 1.4 \text{ m}^2; A_p = 5.7 \text{ m}^2 \\ A &= 0.70 \text{ m}; B = 2.47 \text{ m}; H = 0.56 \text{ m}. \end{aligned}$$

Los valores obtenidos, definen un nuevo diseño de biodigestor solar, y en este caso la relación Ac/AP es 0.245.

Las figuras 6 y 7, muestran la evolución de la temperatura de la masa en digestión a lo largo de una semana, para los dos diseños propuestos. En el primer caso, partiendo con una temperatura de 30°C, se puede observar que ésta desciende levemente, tendiendo luego a elevarse; pero

en el segundo caso la temperatura se estabiliza algo por debajo de la de diseño, lográndose un buen nivel de temperatura sin grandes variaciones.

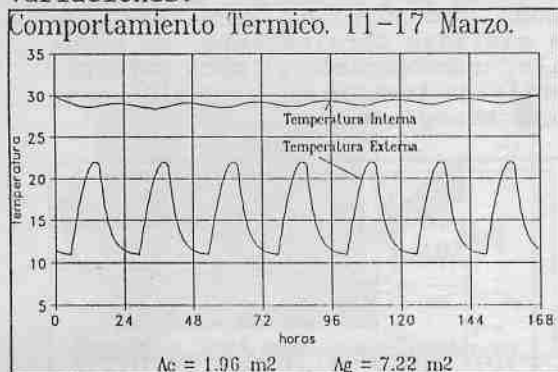


Fig. 6. Simulación Biodigestor con Aporte Solar.

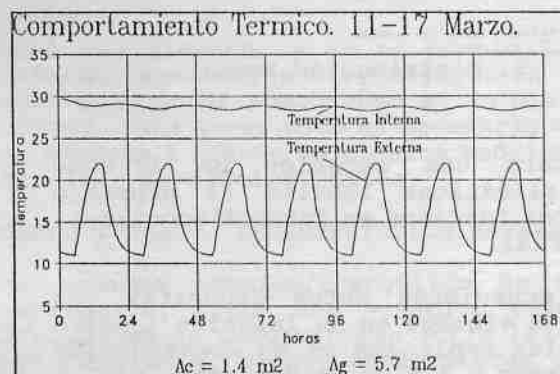


Fig. 7. Simulación Biodigestor con Aporte Solar.

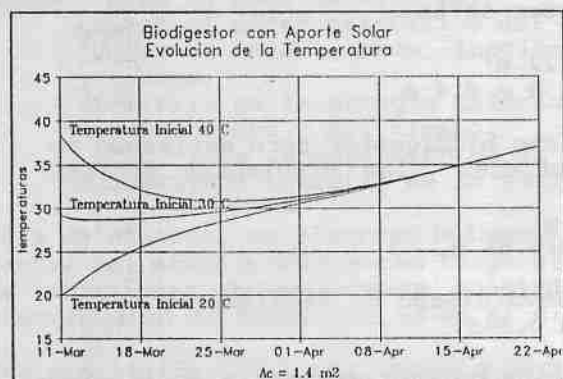


Fig. 8. Temperatura Interna Promedio

Sometiendo el modelo a una simulación para varios días, se observó que, cualquiera sea la temperatura inicial, al cabo de tres semanas, la temperatura interior media del biodigestor tiende a los mismos valores, acercándose al óptimo, y luego creciendo, como muestra la Fig.8.

Los resultados surgidos de la simulación, muestran una idea del comportamiento térmico del sistema. Sería imprescindible ajustar parámetros mediante la convalidación con modelos reales.

CONCLUSIONES:

Del análisis de los resultados obtenidos de la simulación, se puede afirmar que los diseños obtenidos a partir del método propuesto, logran un buen aprovechamiento de la energía solar.

Con parámetros controlados y a una temperatura óptima de 35°C, se obtiene la máxima cantidad de biogas al cabo del mínimo tiempo de retención (10 días para estiércol). En este caso, el rendimiento en la producción de biogas sería del 100% . Para temperaturas de alrededor de 28°C, se estima que sería posible lograr rendimientos del 86%.

REFERENCIAS:

- 1) Stafford, D.; Hawkes, D.; Horton, R. "Methane Production for Waste Organic Matter Methane Production for Waste Organic Matter". CRC Press, Inc., New York. 1980.
- 2) Boffa, C; "Producción de Energía y usos en Areas Rurales - Digestión Anaeróbica". Curso SIES, Bogotá. 1983.
- 4) ENEA - Sogesta. "Tecnologie applicate alla produzione di biogas con digestori anaerobici". Corso Superiore sulle Fonti Alternative D'energia. Urbino, Italia. 1990-1991.
- 5) De Poli, F. "Rapporto sul biogas - Progetto finalizzato Energia, Sottoprogetto Biomasse ed Agricoltura". LBI7. ENEA, Roma, Italia. 1989.
- 6) Nelson, G. H.; Starata, R. P.; Levine, M; "Effect of Temperature of Digestion. Chemical Composition, and Size of Particles on Production of Fuel Gas from Farm Wastes". Industrial Farm Products Research Division; Journal Agricultural Research; Vol. 58, N° 4. 1939.
- 7) Beba, Ali; "Analysis of Solar-Heated Biogas Fermenter". Dep. of Agricultural and Chemical Engineering; Colorado State University. Solar Energy; Vol. 40. 1988.
- 8) Duffie, J. A.; Beckman, W. A.; "Solar Engineering of Thermal Processes"; Wiley Sons; New York; E.E.U.U..1980.
- 9) Iriarte; Sequi; "Diseño y Construcción de un Biodigestor Calefaccionado para Parideras Porcinas". Actas de las XIIa. Reuniones de ASADES; Buenos Aires. 1987.
- 10) Sequi; Iriarte; Ferioli; Colomb; DE Biagi; "Sistemas Solares Pasivos para Calentamiento de Digestores - Diseño y Ensayos preliminares". Actas de las Xa. Reuniones de ASADES; Neuquen. 1985.
- 11) Balcomb, J. D.; Hedstrom, J. C.; Mac Farland, R. D.; "Simulation Analysis of Passive Heated Building". Los Alamos Scientific Laboratory, Univ. of California; Los Alamos, New Mexico; Solar Energy; Vol. 19. 1985.