



USO DE LA ENERGÍA EN LA AGRICULTURA *USE OF THE ENERGY IN AGRICULTURE*

METODOLOGÍA

Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino

Methodology to determine the design and construction parameters of design of biogas installations for little farms

Bernardo Campos Cuní¹

RESUMEN. En Cuba los biodigestores constituyen una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos generados en las empresas agropecuarias, pues permiten disminuir la carga contaminante, mejorar la capacidad fertilizante del material, eliminar los malos olores y se genera una energía renovable denominada *biogás*, que es un gas combustible que puede utilizarse para cocer alimentos, calentar agua, generar electricidad, y obtener luz directamente usando lámparas de gas. En la implementación de la estrategia de enfrentamiento al cambio climático elaborada por el Ministerio de la Agricultura de Cuba, se plantea que para la reducción de emisiones, la medida consistente en “Disminuir el consumo de combustibles de origen fósil, con el empleo de fuentes renovables de energía”. En el trabajo se muestra una metodología para facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para la construcción de biodigestores de cúpula fija.

Palabras clave: energías renovables, biogás.

ABSTRACT. In Cuba the biogas installations are an important alternative for the processing of organic wastes in agricultural farms, and so reducing the contaminants and improving its quality as fertilizer, obtaining a renewable energy, the *biogas*. This combustible gas can be used for food cooking, water heating, the generation of electricity and domestic lighting. In the implementation of the strategy for facing climatic change drew up by the Ministry of Agriculture of Cuba it is considered a measure for the reduction of carbon emission consisting in “Reduce the consumption of combustibles of fossil origin using renewable sources of energy”. The paper shows a methodology for make easy the analysis and calculation of the parameters for the construction of fixed dome biodigesters.

Keywords: renewable energy, biogas.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la mezcla de gases que producen el efecto invernadero, el gas metano contribuye al calentamiento global en un 12%. (Comisión Nacional de Energía, 1985). Se estima que la emisión de metano proveniente de la agricultura contribuye en un alto porcentaje en el efecto invernadero global, principalmente por el cultivo de arroz y la producción animal. (Egglestor, 2006). La producción de ganado trae como resultado emisiones de metano (CH₄) resultante de la fermentación entérica y emisiones de CH₄ de los sistemas de gestión del estiércol del ganado. Los vacunos constituyen una fuente importante de CH₄ debido a su gran población y a la alta tasa de

emisión de CH₄ provocada por su sistema digestivo rumiante (Gil, 1983). Las emisiones de metano producidas por la gestión del estiércol tienden a ser menores que las entéricas; las emisiones más significativas se asocian con operaciones de gestión, en las que el estiércol se maneja por medio de sistemas basados en líquidos y su acumulación en estanques o lagunas (Comisión Nacional de Energía, 1986).

En los tiempos actuales la utilización de los residuos biodegradables para la producción de gas, va ganando espacio como consecuencia de los problemas energéticos provenientes de la crisis petrolífera y del calentamiento global. Se conoce que la actividad energética ocupa una gran importancia para el desarrollo del país que depende en lo fundamental de ener-

Recibido 11/10/09, **aprobado** 31/03/11, **trabajo** 23/11, **metodología**.

¹ Ing., Especialista, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Carretera Fontanar-Wajay, km 2½, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba, ☎ (53-7) 45-3608, 45-1731, 451353; Fax: (53-7) 45-3608; E-✉: mafesch@yahoo.es, iimacyt@minag.cu

gía importada. Los gastos que Cuba realiza en la importación de portadores energéticos representan casi la quinta parte del total de los recursos financieros dedicados a las importaciones de bienes y servicios, alrededor del 5% del PIB nacional (Comisión Nacional de Energía, 1992).

En Cuba los biodigestores constituyen una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos generados en las empresas agropecuarias, pues permiten disminuir la carga contaminante, mejorar la capacidad fertilizante del material, eliminar los malos olores y se genera una energía renovable denominada *biogás*, un gas combustible que puede utilizarse para cocer alimentos, calentar agua, generar electricidad, y obtener luz directamente usando lámparas de gas (Comisión Nacional de Energía, 1990).

Al igual que cualquier otro país, Cuba no puede subestimar los factores de riesgo que puedan comprometer su estabilidad socio-económica, incluyendo los asociados a la dimensión ambiental, pero en el caso particular, a ello se añade como elemento de vulnerabilidad su carácter de pequeño estado insular, reforzado por el prolongado enfrentamiento con el gobierno de los EUA, lo que potencia el peligro de cualquier desliz en nuestro campo de acción (Comisión Nacional de Energía, 1991).

En la implementación de la estrategia de enfrentamiento al cambio climático emitida por el Ministerio de la Agricultura, (MINAG) de Cuba, se plantea para la remoción/retención de carbono y para la reducción de emisiones, la siguiente medida: Disminuir el consumo de combustibles de origen fósil, con el empleo de fuentes renovables de energía. Por otra parte, el Grupo de Energía Renovable del MINAG plantea hacer un plan de construcción de biodigestores con recursos locales en el sector cooperativo y campesino (Damas, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

En consecuencia con lo anteriormente planteado el Grupo de Energía del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric) trabajó en la confección de una metodología con el objetivo de facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para el diseño y construcción de plantas de biogás de cúpula fija (biodigestores), teniendo como herramienta de trabajo el procesador de cálculo Microsoft Excel.

El estiércol animal genera un gran potencial energético si se trata mediante la tecnología de fermentación anaeróbica en biodigestores, plantas de biogás (Martínez, 2003; Sánchez, 2005). En la década de los 70 se inició en Cuba el desarrollo del biogás por diferentes instituciones y empresas, diseñándose distintos tipos de biodigestores en dependencia del uso, lugar y tecnología. En la actualidad muchos de los biodigestores construidos no son explotados debido a su mala ubicación o mal diseño (Martínez, 2003).

La experiencia ha demostrado, que una de las dificultades que se presenta para la construcción de los biodigestores, es la determinación de sus parámetros constructivos. El cálculo resulta una tarea compleja ya que de ellos depende el correcto funcionamiento y eficiencia del biodigestor (Grundey, 1982; Gil, 1983).

En el caso particular del cálculo, el problema está dado, en la determinación de los parámetros de altura y diámetro del tanque de fermentación, para obtener el volumen deseado en correspondencia con el volumen de la cúpula, según el objetivo para lo cual se va a diseñar la planta.

Elementos que componen un biodigestor

- 1. Tanque de digestión:** Es el que define la denominación del biodigestor. El mismo está compuesto por la cámara de fermentación y la cúpula. En la cámara de fermentación anaeróbica el material a descomponer permanece un determinado tiempo, llamado *tiempo de retención*, en el cual ocurre la degradación y liberación del biogás. Su geometría es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen de material a degradar. La función de la cúpula es almacenar el gas en los momentos que no existe consumo, pues la producción de gas es ininterrumpida a lo largo de todo el día. La capacidad de almacenaje de la cúpula depende del volumen de la cámara de fermentación.
- 2. Laguna de compensación:** En ella se acumula el material ya fermentado (digerido), donde puede recogerse. La capacidad de la laguna está en dependencia del volumen del biodigestor (un tercio del mismo) y puede tener diferentes formas (cuadrada, circular, rectangular) y construirse encima de la cúpula o al lado del tanque de fermentación.
- 3. Registro de carga:** Puede tener variadas formas y su tamaño depende del diseño del digestor. En el mismo se introduce el material a fermentar, mezclándose con agua en las proporciones adecuadas y homogenizándose.
- 4. Conducto de carga:** Comunica al registro de carga con el tanque de fermentación.

Principales parámetros para el cálculo de una planta de biogás

- Volumen del digestor: Volumen de la materia orgánica más el agua;
- Volumen de la cámara de fermentación;
- Volumen de la campana: Valor máximo de almacenamiento de gas;
- Volumen de carga: Se refiere al volumen total de materia ya diluido que penetra dentro del digestor por día;
- Tiempo de retención: Este parámetro indica la cantidad de tiempo en días que permanece el material dentro del digestor.

Cálculo del volumen del digestor

- a) *Conociendo la cantidad de materia orgánica que se puede recoger diariamente* para alimentar el biodigestor, el volumen del digestor V_d se calcula mediante la expresión (1).

$$V_d = (kg_{(excreta)} + kg_{(agua)})T_r \quad (1)$$

donde:

T_r – Tiempo de retención (tiempo que requieren las bacterias para degradar la materia orgánica).

El tiempo de retención varía entre 20 y 55 días, en dependencia de la categorías de animales (cerdos, caballos, vacunos, etcétera), ya que se usan diferentes proporciones entre las cantidades de excretas y agua.

b) *Conociendo el requerimiento de biogás diario* ($m^3/día$), se emplea la expresión (2):

$$V_d = C_g / \eta_d \quad (2)$$

donde:

C_g – necesidad de gas, y η_d – eficiencia del biodigestor

c) *Para determinar la necesidad de gas en dependencia de la cantidad de personas* que lo utilizan para fines domésticos, se utiliza la expresión (3):

$$V_d = 0,35 \cdot C_p / \eta_d \quad (3)$$

donde:

C_p – cantidad de personas

Se considera que el gas producido es utilizado con fines familiares para la elaboración de los alimentos tres veces al día y que una persona para satisfacer la necesidad de elaboración de sus alimentos consume $0,35 m^3$ de gas diario.

Ejemplo de cálculo

Un productor puede recoger diariamente 160 kg de estiércol vacuno, procedente de 16 vacas estabuladas.

La relación excreta-agua para el ganado vacuno es 1:1. Considerando un tiempo de retención de 25 días y sustituyendo los valores en la expresión (1), se tiene que:

$$\begin{aligned} V_d &= (kg_{\text{excreta}} + kg_{\text{agua}}) \cdot 25 \\ V_d &= (160 + 160) \cdot 25 \\ V_d &= 8\,000 \text{ L} = 8\,000 \text{ dm}^3 \\ V_d &= 8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del volumen de la cámara de fermentación

El volumen de la cámara de fermentación V_{cf} constituye entre un 75% ~ 80% del volumen del digestor, por lo cual:

$$V_{cf} = V_d \cdot (0,75 \sim 0,80), \text{ m}^3 \quad (4)$$

Considerando el ejemplo anterior en que el volumen del digestor es $V_d = 8 \text{ m}^3$, aplicándolo a la expresión (4), se tendrá que

$$\begin{aligned} V_{cf} &= 8 (0,75 \sim 0,80) \\ V_{cf} &= (6,0 \sim 6,4) \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del volumen de la cúpula

La cúpula es un segmento de una esfera y su volumen V_c está en el rango de 20% ~ 25% del volumen digestor, cuando él mismo tiene un fin doméstico, por tanto se tendrá la expresión:

$$V_c = V_d \cdot (0,20 \sim 0,25) \quad (5)$$

donde:

V_c – Volumen de la cúpula, m^3

Sustituyendo (1) en (5), en el ejemplo se tendrá que:

$$V_c = (1,6 \sim 2) \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen total del digestor

De lo anteriormente planteado se tendrá que el volumen total del digestor V_d es la suma del volumen de la cámara de fermentación V_{cf} más el volumen de la cúpula V_c :

$$V_d = V_{cf} + V_c \quad (6)$$

Cálculo de los parámetros constructivos del biodigestor

Una de las razones constructivas que han provocado que las plantas de biogás con fines domésticos no funcionen con eficiencia, es la inadecuada relación entre el volumen del digestor, el volumen de la cámara de fermentación y el volumen de la cúpula. En forma general para uso en iluminación y cocción de alimentos se deben contar con cúpulas capaces de almacenar el 60% de la producción diaria de biogás.

Parámetros constructivos

Los principales parámetros constructivos del biodigestor son:

- V_d – Volumen del digestor
- V_{cf} – Volumen de la cámara de fermentación
- h_{cf} – Altura de la cámara de fermentación
- d_{cf} – Diámetro de la cámara de fermentación
- r_{cf} – Radio de la cámara de fermentación
- r_c – Radio de la cúpula.
- h_c – Altura de la cúpula.
- V_c – Volumen de la cúpula.

Las operaciones de cálculo contemplan la determinación de los parámetros constructivos que determinan la geometría de la cámara de fermentación y la cúpula. Concluida esa etapa se pasa a establecer la interrelación entre el digestor, el tanque de fermentación y la cúpula que responda a las condiciones preestablecidas. El cálculo se basa en determinar los valores del diámetro d_{cf} y la altura h_{cf} de la cámara de fermentación y el volumen de la cúpula V_c . Calculando el volumen del biodigestor (V_d) mediante alguna de las expresiones (1), (2) ó 3, y recordando que el volumen de la cámara de fermentación (V_{cf}) representa entre un 75% ~ 80% y la cúpula entre un 25% ~ 20% del digestor, se emplea la expresión del volumen de un cilindro (Oberg and Jones, 1979):

$$V_{cf} = \pi d_{cf}^2 h_{cf} / 4 \quad (7)$$

Pero esta es una ecuación con dos incógnitas, por lo que no se puede resolver todavía la misma, pues no se tienen los valores del diámetro y la altura de la cámara.

Se asume la relación d/h como un valor conocido, es decir:

$$X = d_{cf} / h_{cf} \quad (8)$$

Despejando d_{cf} en la expresión (8) se tendrá $d_{cf} = X h_{cf}$. Entonces, sustituyendo en (7) se tiene que $V_{cf} = \pi (X h_{cf})^2 h_{cf} / 4 = \pi X^2 h_{cf}^3 / 4$

Despejando h_{cf} y sustituyendo en la expresión (7) se obtienen los valores de la altura y el diámetro de la cámara.

$$h_{cf} = \sqrt[3]{\frac{4V_{cf}}{\pi X^2}} \quad d_{cf} = \sqrt{\frac{4V_{cf}}{\pi h_{cf}}} \quad r_{cf} = d_{cf}/2$$

Cálculo del resto de los parámetros

$$r_c = \sqrt{h_{cf}^2 + r_{cf}^2} \quad h_c = r_c - h_{cf} \quad V_c = \pi h_c \left(\frac{d_{cf}^2}{8} + \frac{h_c^2}{6} \right)$$

Teniendo estas expresiones, se le dan valores a X y así se determinan los parámetros constructivos del digestor. Para determinar cuáles son los valores óptimos de los parámetros para la construcción del digestor se busca la interrelación entre el digestor, la cámara de fermentación y la cúpula, según

las condiciones preestablecidas.

Donde:

$$V_{cf} = (0,75 \sim 0,80) V_d$$

$$V_c = (0,25 \sim 0,20) V_d$$

DESARROLLO DEL TRABAJO

El cálculo de los parámetros y su interrelación resulta una tarea compleja. Para facilitar el trabajo se elabora una tabla utilizando una hoja del procesador de cálculo Microsoft Excel.

TABLA 1. Cálculo de los parámetros constructivos del digestor

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X	V _d	V _{cf}	V _c	h _{cf}	d _{cf}	r _{cf}	r _c	h _c	V _c	V _d

Las columnas 3 y 4 son las condiciones preestablecidas, y la 11 representa la interrelación entre V_d, V_{cf} y V_c. La columna 11 es la suma de la columna 3 y 10.

Los valores óptimos para la construcción del digestor se seleccionan en la fila donde el valor de V_d de la columna 11 es semejante al valor de V_d de la columna 2.

En la Tabla 2 se calculan los parámetros para el digestor de 8 m³ que se tomó como ejemplo, cuando V_{cf} = 0,75V_d y en la Tabla 3 cuando V_{cf} = 0,80V_d.

TABLA 2. Cálculo de los parámetros del digestor cuando V_{cf} = 0,75V_d.

X	V _d	V _{cf}	V _c	h _{cf}	d _{cf}	r _{cf}	r _c	h _c	V _c	V _d
2,55	8	6	2	1,06	2,69	1,35	1,71	0,65	2,01	8,01
2,56	8	6	2	1,05	2,69	1,35	1,71	0,66	2,02	8,02
2,57	8	6	2	1,05	2,70	1,35	1,71	0,66	2,03	8,03
2,58	8	6	2	1,05	2,70	1,35	1,71	0,66	2,05	8,05
2,59	8	6	2	1,04	2,71	1,35	1,71	0,66	2,06	8,06
2,60	8	6	2	1,04	2,71	1,35	1,71	0,67	2,08	8,08
2,70	8	6	2	1,02	2,74	1,37	1,71	0,69	2,21	8,21

De la Tabla 2 se puede escoger cualquiera fila para construir el digestor, con preferencia a las seis primeras filas.

TABLA 3. Cálculo de los parámetros del digestor cuando V_{cf} = 0,80V_d.

X	V _d	V _{cf}	V _c	h _{cf}	d _{cf}	r _{cf}	r _c	h _c	V _c	V _d
2,16	8	6,4	1,6	1,20	2,60	1,30	1,77	0,57	1,61	8,01
2,17	8	6,4	1,6	1,20	2,61	1,30	1,77	0,57	1,62	8,02
2,18	8	6,4	1,6	1,20	2,61	1,30	1,77	0,57	1,63	8,03
2,19	8	6,4	1,6	1,19	2,61	1,31	1,77	0,58	1,65	8,05
2,20	8	6,4	1,6	1,19	2,62	1,31	1,77	0,58	1,66	8,06
2,23	8	6,4	1,6	1,16	2,66	1,33	1,76	0,61	1,79	8,19
2,24	8	6,4	1,6	1,12	2,69	1,35	1,75	0,63	1,93	8,33

De la Tabla 3 se pueden seleccionar las 5 primeras filas para construir el digestor, no deben escogerse las filas 6 y 7 por no cumplir con las condiciones preestablecidas, ya que las cúpulas representan entre el 22% ~ 24% de V_d respectivamente.

CONCLUSIONES

- Se confeccionó una metodología con el objetivo de facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para el diseño y construcción de plantas de biogás de cúpula fija (biodigestores), teniendo como herramienta de trabajo el procesador de

cálculo Microsoft Excel.

- La experiencia ha demostrado, que una de las dificultades que se presenta para la construcción de los biodigestores, es la determinación de sus parámetros constructivos.
- Las operaciones de cálculo contemplan la determinación de los parámetros constructivos que determinan la geometría

de la cámara de fermentación y la cúpula.

- La metodología para facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para la construcción de biodigestores de cúpula

fija, es una herramienta muy útil en el proceso de diseño de estas instalaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (4), 1985.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (1), 1986.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (1), 1990.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (2), 1991.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (1 y 2), 1992.

DAMAS, M. R.: *Plantas de biogás de pequeñas dimensiones para comunidades rurales*, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba, (plegable), 2000.

EGGLESTOR, S.: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, Japón, 2006

GIL, E. E.: *Energía y biofertilizantes*, Manual de producción y utilización, Buenos Aires, Argentina, 1983.

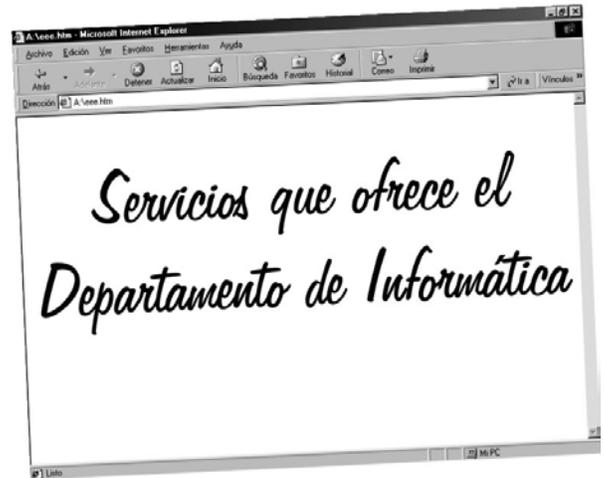
GRUNDEY, K.: *Tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos*, Editorial GEA, Barcelona, España, 1982.

MARTÍNEZ, C. J. A.: *Desarrollo de una nueva familia de biodigestores y de una tecnología mecanizada para la producción de fertilizantes*, Proyecto de investigación, etapa 01, La Habana, Cuba, 2003.

OBBERG, E. and D. JONES: *Manual universal de la técnica mecánica*, Barcelona, España, 1979.

SÁNCHEZ, E. J. V.: *Introducción a la producción de biogás*, Cárdenas, Matanzas, Cuba, 2005.

Universidad Agraria de La Habana



Diseño y montaje de Proyectos de Redes

Diseño y montaje de Proyectos de Informática Educativa

- Cursos*
- Diseño de Páginas WEB
 - Programación bajo ambiente WEB
 - Programación bajo ambiente Windows
 - Sistema de información geográfica
 - Diseño de multimedias
 - Teleclases

Para mayor información: E_mail: lilibeth@isch.edu.cu