

Dimensionamiento de dos biodigestores para la producción de metano en la FES Cuautitlán, empleando la materia fecal de conejos y vacas

HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Víctor*†, OLVERA-GARCÍA, Omar, GUZMÁN-TINAJERO, Pedro y MORILLÓN-GÁLVEZ, David

Universidad Nacional Autónoma de México, FES Cuautitlán, Estado de México y Cd. Universitaria, Ciudad de México, México

Recibido Julio 4, 2017; Aceptado Septiembre 7, 2017

Resumen

Este documento presenta los cálculos para el dimensionamiento de dos biodigestores para la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC Cuautitlán), empleando los desechos orgánicos de los conejos y vacas que se tienen para la carrera de Médico Veterinario Zootecnista (MVZ). Se utilizaron los resultados obtenidos en un proyecto anterior, en el cual se obtuvieron los porcentajes de metano que se pueden tener por kilogramo de materia orgánica de varios animales de la FESC Cuautitlán. Para dimensionar cada biodigestor, se obtuvieron el potencial de generación de biogás, la masa seca y masa volátil para los desechos orgánicos de vaca y conejo y sus respectivos tiempos de retención, por último, se obtuvo el volumen final de cada biodigestor considerando un factor de seguridad. La construcción de estos dos biodigestores puede contribuir a reducir la disposición final de los desechos orgánicos de la FESC Cuautitlán, produciendo abono que puede ser aprovechado en los campos destinados a la carrera de Ingeniero Agrícola (IA).

Biodigestor, materia orgánica, biogás, metano

Citación: HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Víctor, OLVERA-GARCÍA, Omar, GUZMÁN-TINAJERO, Pedro y MORILLÓN-GÁLVEZ, David. Dimensionamiento de dos biodigestores para la producción de metano en la FES Cuautitlán, empleando la materia fecal de conejos y vacas. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-3: 44-53

Abstract

This document presents the calculations for the sizing of two digesters for the Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC Cuautitlán), using organic waste from the rabbits and cows that are for the career of Veterinary Zootechnician (MVZ). The results obtained in an earlier project were used, in which the percentages of methane that can be taken per kilogram of organic matter from several animals of the FESC Cuautitlán were obtained. The biogas generation potential, the dry mass and the volatile mass for the organic cow and rabbit waste and their respective retention times were obtained for each digester. Finally, the final volume of each digester was obtained, considering a factor of security. The construction of these two digesters can contribute to reduce the final disposition of the organic waste of the FESC Cuautitlán, producing fertilizer that can be used in the fields destined to the Agricultural Engineer (IA).

Organic matter, digester, biogas and methane

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: vichugo@unam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La problemática generada por la alta producción de desechos orgánicos, lleva a la necesidad de buscar alternativas para su correcto manejo y aprovechamiento, los biodigestores son dispositivos que pueden solventar esta problemática, dado que además de recuperar el biogás obtenido por la descomposición de la materia orgánica, el residuo resultante sirve como fertilizante. En la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM (FES Cuautitlán), se pueden aprovechar los desechos orgánicos producidos tanto por los animales existentes en los corrales pertenecientes a la carrera de Médico Veterinario Zootecnista (MVZ), como los desechos orgánicos producto del cultivo de productos agrícolas (maíz, alfalfa, sorgo, cebolla, vides, nopal, etc.) de los campos de la Carrera de Ingeniero Agrícola (IA), para obtener biogás (metano) que puede ser suministrado a los laboratorios o que permita calentar agua para diferentes usos por ejemplo regaderas del gimnasio y para limpieza en los comedores. En general se pueden aprovechar los desechos presentados en la tabla 1.

Origen	Tipo de desecho
Origen animal	Estiércol de ganado vacuno (vaca y toro)
	Estiércol de ganado ovino y caprino (borrego, cabras y chivos)
	Estiércol de ganado equino (caballo, mula, burro y poni)
Agrícolas	Poda de pasto y árboles
	Residuos de cosechas
Cocina	Residuos de comedores
	Residuos de la fabricación de alimentos

Tabla 1 Clasificación de los desechos orgánicos encontrados en la FESC

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un proyecto patrocinado por el programa UNAM-DGAPA-PAPIIT-IT104212 y el UNAM-DGAPA-PAPIME-PE101912, el cual consistió en conocer la cantidad de metano que se puede generar por cada materia orgánica de la FES Cuautitlán.

Para el proyecto se construyeron 12 biodigestores del tipo Batch, con volumen total de 33 litros y una presión de operación de 7 psi, los cuales fueron instrumentados para medir la presión, temperatura, pH del sustrato y la composición del biogás producido. Se realizaron dos pruebas, la primera fue de 84 días y la segunda de 96 días, en ambas se trabajó con los 12 biodigestores simultáneamente y con cinco diferentes tipos de materia orgánica en cada prueba.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en dicho proyecto y se puede observar que el excremento de conejo es el que presenta la mayor producción de biogás, alcanzando los porcentajes más altos de metano que son en algunos casos mayores al 70%. El excremento de ganado vacuno también presentó una buena producción de biogás en ambas pruebas y alcanzo porcentajes de metano muy cercanos a los de excremento de conejo. En la segunda prueba la producción de biogás en litros por kilogramo de estiércol máxima fue de 0.708 lt/kg de excremento de conejo y 0.26 lt/kg de excremento de vaca. Las pruebas realizadas con algunas materias orgánicas, como la poda de pastos y los desechos de comida se vieron influenciadas por un pH muy ácido que inhibió por completo el proceso de fermentación anaeróbica. Otras pruebas se vieron influenciadas por el cambio drástico de la temperatura ambiental, cuando esta disminuyó ocasionó que la producción de biogás disminuyera considerablemente.

Biodigestor	Tipo de estiércol y proporción materia orgánica agua	Kg de estiércol dentro de cada biodigestor	Kg de MV dentro de cada biodigestor	Litros de biogás al día por Kg de MV	Litros de biogás al día por Kg de estiércol	Porcentaje Máximo de CH ₄ alcanzado
1	Caballo a 1:1	4.000	0.688	0.327	0.056	53.250
2	Caballo a 1:2	2.667	0.459	0.774	0.133	50.990
3	Cabra a 1:1	4.000	0.619	0.290	0.045	18.250
4	Cabra a 1:2	2.667	0.413	0.724	0.112	13.300
5	Borrego a 1:1	4.000	0.550	0.371	0.051	12.560
6	Borrego a 1:2	2.667	0.367	0.263	0.036	8.490
7	Vaca a 1:1	4.970	1.031	1.078	0.224	67.850
8	Vaca a 1:2	3.313	0.688	0.809	0.168	66.660
9	Vaca a 1:3	2.485	0.516	1.254	0.260	62.290
10	Conejo a 1:1	3.750	1.126	1.576	0.473	75.870
11	Conejo a 1:2	2.500	0.750	2.044	0.614	77.220
12	Conejo a 1:3	1.875	0.563	2.358	0.708	72.150

Tabla 2 Producción de litros de biogás por kilogramo de masa volátil (MV) al día

Fuente: Elaboración propia

Diseño

Para seleccionar el tipo de biodigestor se tomó en cuenta lo siguiente:

El volumen de excremento producido por los animales en un día.

Tiempo de retención hidráulica de la materia orgánica.

Volumen de gas estimado durante el tiempo de retención hidráulica.

Dimensionamiento de los biodigestores

Para el dimensionamiento del biodigestor se obtuvo el volumen total de materia orgánica que se produce en la escuela, posteriormente se determinó su masa seca y masa volátil para estimar el volumen total incluyendo el agua empleada para la dilución. Finalmente se consideró la cantidad de biogás que produciría esa materia orgánica y se dimensionó el biodigestor.

Con los resultados obtenidos en el estudio anterior, se consideró el dimensionar un biodigestor para los residuos de conejos y otro para los residuos de vaca.

En la FES Cuautitlán se cuenta con diferentes tipos de ganado, el número de animales por cada tipo de ganado se muestra en la tabla 3.

Animal	Cantidad
Equinos	25
Cabras	64
Borregos	69
Vacas	100
Conejos	3300

Tabla 3 Población de ganado en la FES Cuautitlán

Fuente Elaboración propia

De acuerdo a estudios de campo realizados por la Universidad del Estado de Iowa (Iowa StateUniversity) en el año de 1985, se puede estimar que una vaca de 450 kg puede excretar en promedio 37.2 kg de materia orgánica, del cual, 70% corresponde a estiércol, por lo cual se tiene:

$$37.2kg(0.7) = 26.39kg$$

De los 37.2 kg de excretas de vaca, 26.39 kg son de estiércol. Actualmente la FES Cuautitlán cuenta con una población de 100 vacas. Si tomamos en cuenta que cada vaca, en promedio genera 26.39 kg/día de estiércol, podemos estimar que en un día se acumula en total, 2639 kg/día de estiércol.

Para fines de dimensionamiento del biodigestor, se tomó en cuenta una producción de 2000 kg/día de estiércol. En términos de volumen por día se tiene:

$$V_E = \frac{m}{\rho} = \frac{\left(2000 \frac{kg}{día}\right)}{\left(994 \frac{kg}{m^3}\right)} = 2.012 \frac{m^3}{día}$$

Tomando los datos anteriormente expuestos del porcentaje de MS y MV se puede calcular la MS y MV de la cantidad de estiércol que se propone para el biodigestor:

Masa seca (MS) en kg:

$$MS(kg) = 0.25(2000kg) = 500 kg$$

Masa seca (MS) en m³:

$$MS(m^3) = 0.25(2.012m^3) = 0.503 m^3$$

Masa volátil (MV) en kg:

$$MV(kg) = 0.83(500 kg) = 415 kg$$

Masa volátil (MV) en m³:

$$MV(m^3) = 0.83(0.5030175 m^3) = 0.418 m^3$$

Se estima que los biodigestores continuos requieren mezclas con una proporción de sólidos del 10% del total de la mezcla. Porcentaje de dilución (D)= 10 % (90 % Agua). Por lo tanto, el afluente requerido será:

$$Q_a = \frac{MS}{D} = \frac{0.503 m^3}{0.1} = 5.030 m^3$$

El Volumen de agua necesario para la mezcla será de:

$$V_{H_2O} = Q_a - V_E = 5.030 m^3 - 2.012 m^3 = 3.018 m^3$$

El volumen útil que entrará en el biodigestor diariamente será de 5.030 m³, por lo tanto, el tanque de alimentación deberá poder contener al menos esta cantidad para ser ingresada al biodigestor. Se debe estimar un borde libre en el tanque de mínimo 0.3 m.

En el caso de los biodigestores que contenían excremento de vaca se detectaron valores de metano comprendidos del 50-65% de la mezcla de biogás, después de 50 días de fermentación anaerobia y hasta los 96 días que duró la prueba. Para determinar el tiempo de retención hidráulica (TRH) se debe ser muy cuidadoso, ya que, un lapso corto de fermentación podría ocasionar que no se aproveche todo el potencial de la materia orgánica, por el contrario, si el lapso de fermentación es alto podría ocasionar una inhibición de la producción de metano a falta de alimento de las bacterias metanogénicas. En este caso, se decidió que el tiempo de retención hidráulica óptimo para el proceso sería la media en el lapso en el que se obtuvieron valores por encima del 50% hasta el punto máximo de producción de metano. De acuerdo a los resultados obtenidos del experimento tomado como base, el tiempo de retención hidráulica sería de 73 días.

Para calcular el volumen del digestor (Vd) fue necesario relacionar el TRH y el afluente requerido (Q_a):

$$V_d = Q_a \cdot TRH = (5.030 m^3)(73) = 367.203 m^3$$

Con la MV del estiércol y el volumen del digestor (Vd), se puede calcular la carga orgánica volumétrica (COV) como sigue:

$$COV = \frac{MV}{V_d} = \frac{415 \frac{kgMV}{día}}{367.2028 m^3} = 1.13 \frac{kgMV}{m^3 día}$$

Para determinar el volumen total del biodigestor se debe considerar que comprende el volumen útil más el volumen de almacenamiento del biogás más el volumen de seguridad de 20% del volumen calculado, para amortiguar posibles variaciones en la producción de biogás. Dado que la producción de biogás por día para el estiércol de vaca es bajo se considera que el volumen destinado al almacenamiento de biogás debe ser suficiente para contener una producción de biogás de al menos el tiempo de retención hidráulica de esta mezcla, es decir, 73 días.

En base a los resultados obtenidos del estudio realizado con los biodigestores de estiércol de vaca, se ha llegado a la conclusión que, en promedio, 1 kg de masa volátil (MV) de estiércol de ganado vacuno produce 1.254 LBG/día (litros de biogás por día).

De acuerdo al dato anterior la producción de biogás en metro cúbicos por kilogramo de MV al día será de:

$$\left(1.254 \frac{LBG}{kgMVdía}\right) \left(\frac{1 m^3}{1000 L}\right) = 1.254 \times 10^{-3} \frac{m^3 BG}{kgMVdía}$$

Por lo tanto, la producción de biogás diaria (PBD) será de:

$$= \left(1.254 \times 10^{-3} \frac{m^3 BG}{kgMVdía}\right) (415 kgMV) = 0.521 \frac{m^3 BG}{día}$$

Haciendo el cálculo de volumen de almacenamiento de biogás durante el tiempo de retención hidráulica:

$$0.5206 \frac{m^3 BG}{día} (73 días) = 38.003 m^3$$

Más el 20% de volumen de seguridad:

$$38.0031 m^3 (1.2) = 45.604 m^3$$

Por lo tanto, el volumen total del biodigestor para excremento de vaca será de:

$$V_T = 367.203 m^3 + 45.604 m^3 = 412.807 m^3$$

En el caso de conejos, en la FES Cuautitlán se cuenta con una población de 3300 ejemplares, considerando que excretan en promedio 40 gr diarios cada uno, se generará una cantidad de excremento de 132 kg diarios aproximadamente. La densidad del excremento de conejo es de 750 kg/m³, por lo tanto, en términos de volumen será:

$$V_E = \frac{m}{\rho} = \frac{\left(132 \frac{kg}{día}\right)}{\left(750 \frac{kg}{m^3}\right)} = 0.176 \frac{m^3}{día}$$

Tomando los datos anteriormente mencionados de MS y MV:

Masa seca (MS) en kg:

$$MS(kg) = 0.39(132 kg) = 51.48 kg$$

Masa seca (MS) en m³:

$$MS(m^3) = 0.39(0.176 m^3) = 0.069 m^3$$

Masa volátil (MV) en kg:

$$MV(kg) = 0.77(51.48 kg) = 39.64 kg$$

Masa volátil (MV) en m³:

$$MV(m^3) = 0.77(0.069 m^3) = 0.053 m^3$$

Se estima que los biodigestores continuos requieren mezclas con una proporción de sólidos del 10% del total de la mezcla. Porcentaje de dilución (D)= 10% (90% Agua). Entonces el afluente requerido será:

$$Q_a = \frac{MS}{D} = \frac{0.069 \text{ m}^3}{0.1} = 0.686 \text{ m}^3$$

el volumen de agua necesario para formar la mezcla será de:

$$V_{H_2O} = Q_a - V_E = 0.686 \text{ m}^3 - 0.176 \text{ m}^3 = 0.510 \text{ m}^3$$

El volumen útil del tanque de alimentación debe ser capaz de albergar, por lo menos, 0.686 m^3 . Se debe estimar un borde mínimo libre en el tanque de 0.3 m.

Bajo los mismos argumentos citados para la determinación del TRH del biodigestor de vaca, se ha seleccionado un tiempo de retención hidráulica para las excretas de conejo de 50 días.

Para calcular el volumen del digestor es necesario relacionar el TRH y el afluente requerido (Q_a):

$$V_d = Q_a \cdot TRH = (0.686 \text{ m}^3)(50) = 34.32 \text{ m}^3$$

Una vez calculada la MV del estiércol y el volumen del digestor, se calcula la carga orgánica volumétrica (COV) como sigue:

$$COV = \frac{MV}{V_d} = \frac{39.64 \frac{\text{kgMV}}{\text{día}}}{34.32 \text{ m}^3} = 1.155 \frac{\text{kgMV}}{\text{m}^3 \text{ día}}$$

Para determinar el Volumen total se requiere considerar el volumen de almacenamiento para el biogás y el 20 % adicional para las posibles variaciones en la producción de biogás. Al igual que en el biodigestor de excremento de vaca se propone poder almacenar el biogás generado por todo el TRH, es decir, 50 días.

Con base en los resultados obtenidos en el proyecto, se ha llegado a la conclusión que, en promedio, 1 kg de masa volátil (MV) de excremento de conejo produce 2.358 LBG/día (litros de biogás por día).

Por lo tanto, la producción de biogás en metros cúbicos por kilogramo de MV de excremento de conejo al día será de:

$$\left(2.358 \frac{\text{LBG}}{\text{kgMV día}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right) = 2.358 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{BG}}{\text{kgMV día}}$$

Para la cantidad de excretas de conejo producido en la FESC se estima una producción de biogás diaria (PBD) de:

$$\begin{aligned} &= \left(2.358 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{BG}}{\text{kgMV día}}\right) (39.64 \text{ kgMV}) \\ &= 0.094 \frac{\text{m}^3 \text{BG}}{\text{día}} \end{aligned}$$

El volumen de almacenamiento de biogás durante el tiempo de retención hidráulica será:

$$0.093 \frac{\text{m}^3 \text{BG}}{\text{día}} (50 \text{ días}) = 4.674 \text{ m}^3$$

Más el 20% de volumen de seguridad:

$$3.122 \text{ m}^3 (1.2) = 5.609 \text{ m}^3$$

Volumen total del biodigestor:

$$V_T = 34.32 \text{ m}^3 + 5.609 \text{ m}^3 = 39.929 \text{ m}^3$$

En la tabla 4 se resumen las dimensiones para los biodigestores propuestos para la FESC Cuautitlán, además, en las figuras 1 a la 4 se muestran los planos para el biodigestor de excremento de vaca y de la figura 5 a la 8 para el biodigestor designado a las excretas de conejo. Se muestran las características que se proponen para el tanque de alimentación, descarga, reactor y la vista de conjunto de los dos biodigestores.

Descripción	Capacidad Biodigestor Vaca	Capacidad Biodigestor Conejo
Volumen del Tanque de alimentación	5.03 [m ³]	0.70 [m ³]
Volumen del tanque de descarga	5.03 [m ³]	0.70 [m ³]
Volumen total del biodigestor	367.20 [m ³]	39.93 [m ³]
Cantidad de estiércol diario necesario	2000.00 [kg]	132.00 [kg]
Cantidad de agua necesaria	3018.11 [Litros]	510.40 [Litros]
Producción de biogás diaria	520.58 [Litros]	93.48 [Litros]

Tabla 4 Características de los biodigestores propuestos

Fuente Elaboración propia

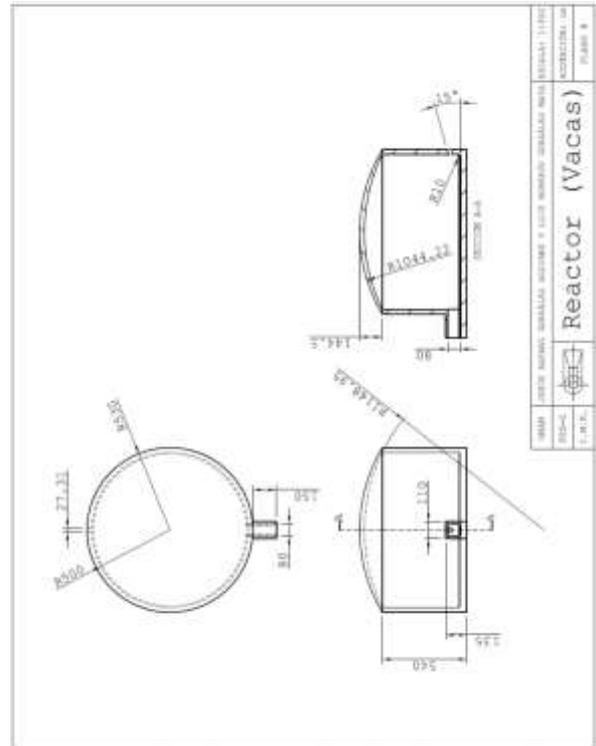


Figura 2 Reactor. Vacas

Fuente Elaboración propia

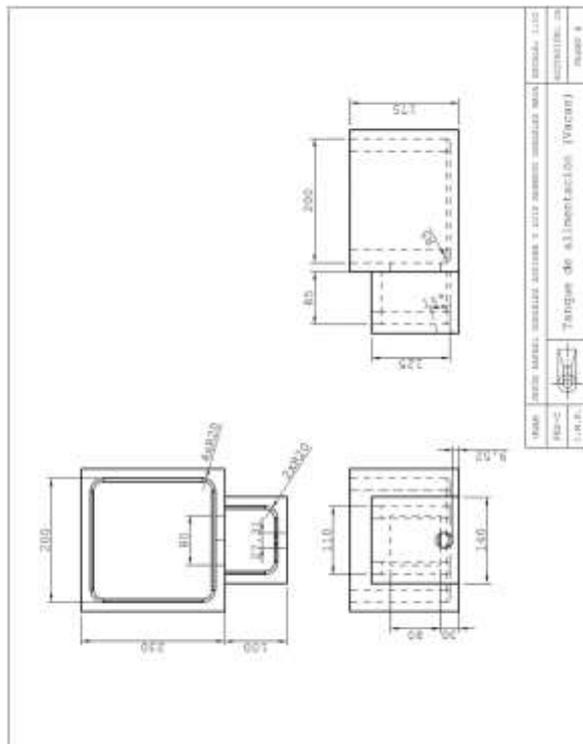


Figura 1 Tanque de alimentación. Vacas

Fuente Elaboración propia.

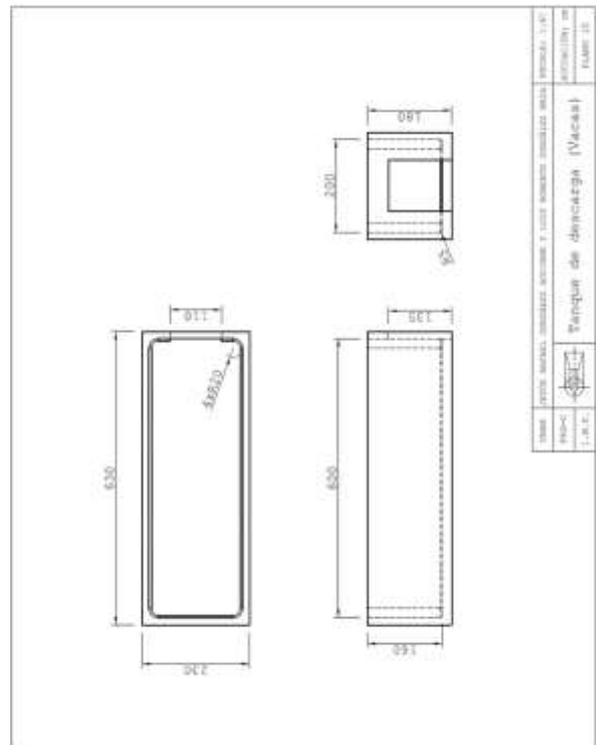


Figura 3 Tanque de descarga. Vacas

Fuente Elaboración propia

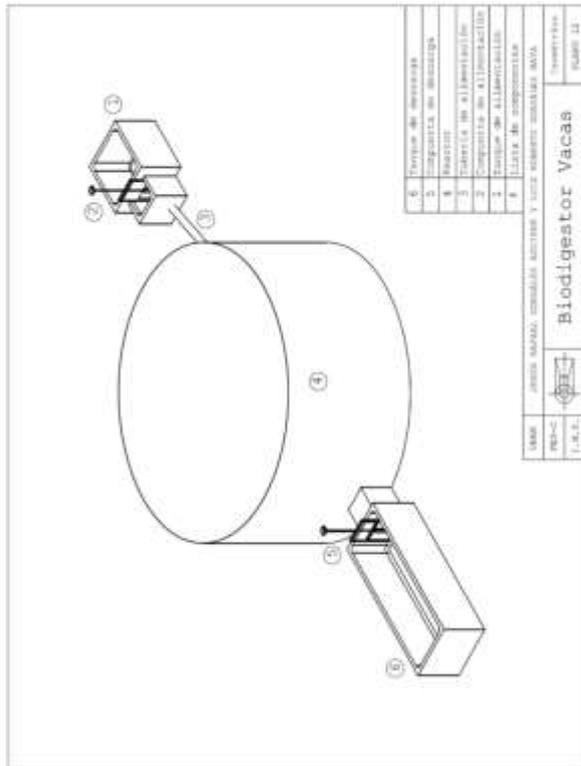


Figura 4 Biodigestor. Vacas

Fuente Elaboración propia

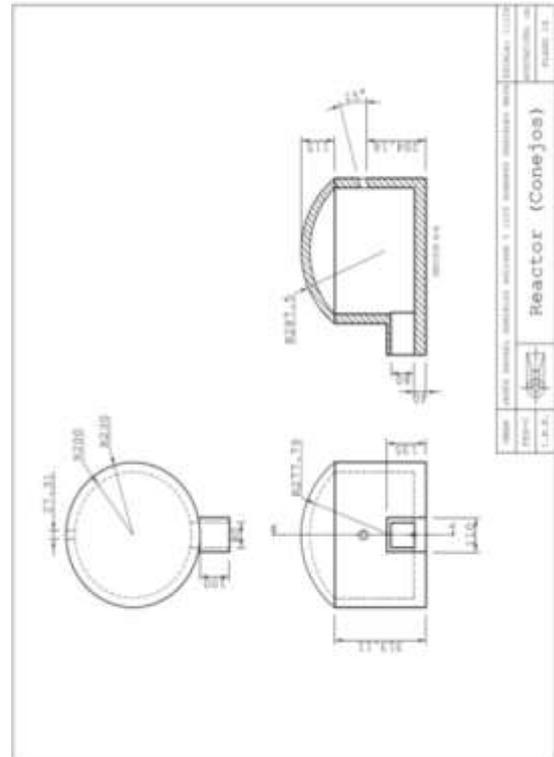


Figura 6 Reactor. conejos

Fuente Elaboración propia

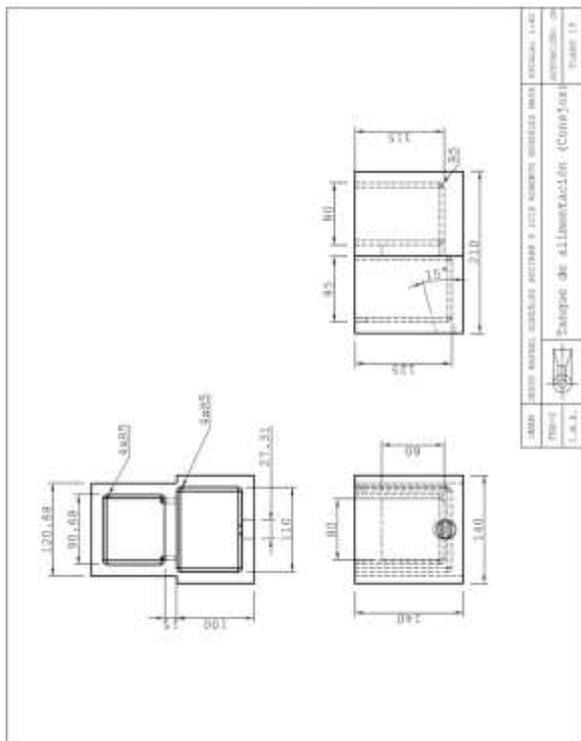


Figura 5 Tanque de alimentación. Conejos

Fuente. Elaboración propia

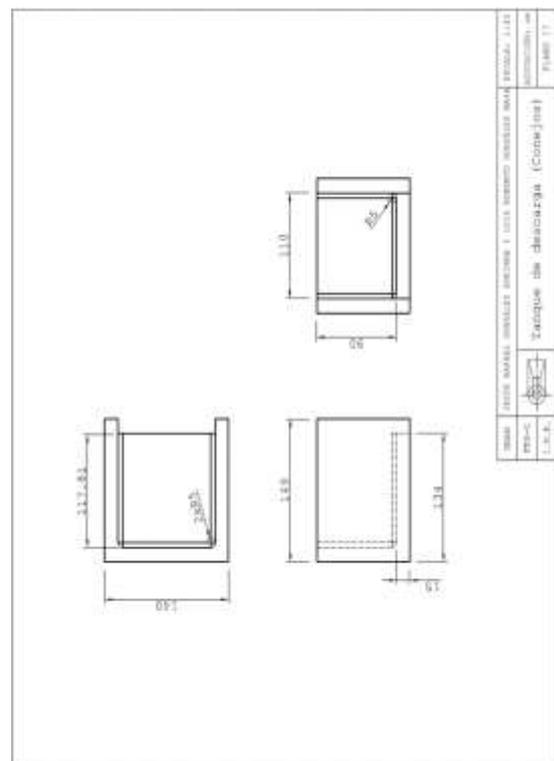


Figura 7 Tanque de descarga. Conejos

Fuente. Elaboración propia.

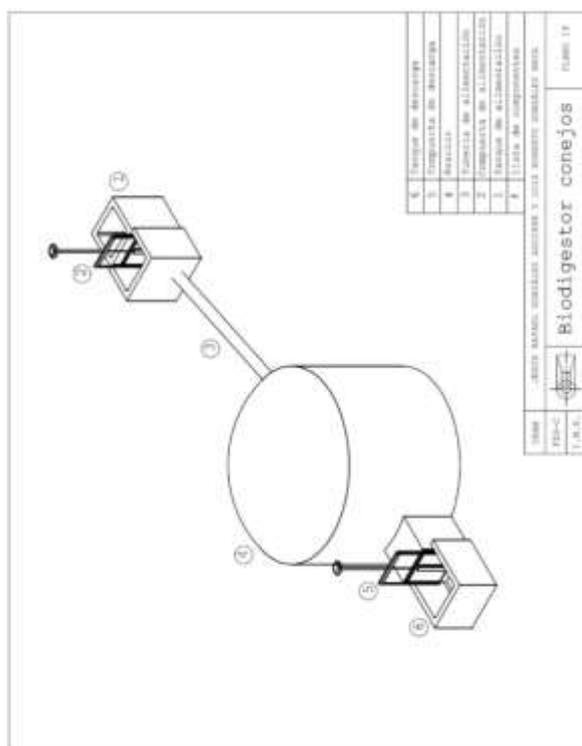


Figura 8 Biodigestor. Conejos

Fuente. Elaboración propia.

Conclusiones

Con la construcción de los biodigestores propuestos, se podría solucionar el problema de la disposición y almacenamiento de los desechos orgánicos de la FES Cuautitlán, ya que se evitaría que la descomposición de este material fuera al aire libre, evitando el mal olor. Además, el residuo que se obtiene del biodigestor puede ser empleado como composta o abono, en los terrenos de cultivo con los que cuenta la carrera de Ingeniería Agrícola.

Agradecimientos

Se agradece al programa UNAM-DGAPA-PAPIIT-IT104212 y el UNAM-DGAPA-PAPIME-PE101912, por los apoyos brindados para la realización del proyecto.

Referencias

- Camps Rabadá, J. (1978). *Producción de estiércol cunícola y su valoración como abono*. Barcelona: Purina.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (2ª ed). Madrid: Ediciones del Castillo.
- Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. (2ª ed.) Perú: Organización Panamericana para la Salud.
- Askeland, D. R. (2012) *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (6ª ed.). México: Cengage Learning.
- Chang, R. (2013). *Química general para bachillerato*. (1ª ed.), México: Mcgraw-Hill Interamericana.
- ThyS., Preston, T. R. & Ly, J. (2003). Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent. *Livestock Research for Rural Development*, 15 (7).
- Beer, F., Russell J. E. & Dewolf, J. T. (2013). *Mecánica de materiales*. (6ª ed). México: Mcgraw-Hill Interamericana.
- Campos, E., Illa, J., et al. (2004). *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas*. Cataluña: Agencia de residuos de Cataluña.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de materiales*. (8ª ed.). México: Pearson Educación.
- Mott, R. L. (2015). *Mecánica de fluidos*. (7ª ed). México: Pearson Educación.
- Lansing, S., Botero Botero, R. & Martín, J. F. (2008). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology*, 99, 5881–5890.

Moncayo Romero, G.
(2008) *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.*

España: AqualimpiaBeratendeIngenieure.

Atem, A.D., Indiveri, M.E. & Llamas S.
(2010). Biomass storage for further energy use through biogas production. *International Journal of hydrogen energy*, 35, 6048 – 6051.

Ferrer, I., Garfi, M., Uggetti, E., Ferrer-Martí, L., Calderon, A., Velo, E. (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and bioenergy*, 35, 1668 – 1674.

González Aguirre, J. R., González Maya, L. R., Hernández Gómez, V. H., & Olvera García, O. (2013) Fabricación de prototipos para la obtención de biogás. *Memorias del Octavo Congreso Científico Tecnológico de las carreras de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Industrial y Telecomunicaciones, Sistemas y Electrónica*. ISBN: 978-607-02-4551-0. México: FESC.

González Aguirre, J. R. & González Maya, L. R. (Octubre de 2014). *Diseño y construcción de un prototipo experimental que permita estudiar la generación de biogás mediante materia orgánica*. (Tesis de licenciatura). México: FESC–UNAM.

Hernández Gómez, V. H., Olvera García, O., Martínez Ávila, M. A., Gonzalez Aguirre, R. & Gonzalez Maya, R. (2015). Obtención de biogás a través de diferentes materias orgánicas. *Investigaciones sobre Innovación y desarrollo tecnológico*. México: CIINDET.