

Original

DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUALES SÓLIDOS DEL PROCESAMIENTO CÁRNICO

Design of an anaerobic biodigester for the treatment of solid wastes from slaughterhouses

Dr. C. Yans Guardia-Puebla, Universidad de Granma, yguardiap@udg.co.cu, Cuba

Dr. C. Yoandro Rodríguez-Ponce, Universidad de Granma, yrodriguezp@udg.co.cu, Cuba

Ing. Osmir Benítez-Quintero, Universidad de Granma, obenitezq@udg.co.cu, Cuba

Recibido 08/07/2017- Aceptado 11/09/2017

RESUMEN

El enfoque principal del trabajo consiste en diseñar un sistema anaerobio de primera generación para dar tratamiento a los residuos sólidos generados en la UEB Cárnico Bayamo y la producción de biogás. Como metodología de diseño se utilizó la secuencia de diseño de los biodigestores de cúpula fija del tipo GBV, el cual fue diseñado usando software SolidWorks 2014. Con este sistema se propone una alternativa adecuada para generalizar de manera sostenible y económica la producción de biogás en las plantas que procesan cárnicos. Para el diseño, se utilizaron los datos de los animales sacrificados entre los años 2013 – 2016, para poder determinar la cantidad de materia sólida orgánica que diariamente se genera en la entidad. Como propuesta del trabajo, es necesario la construcción de 2 biodigestores de 47,5 m³, obtenido así un volumen diario aproximado de biogás de 15 m³.

Palabras claves: diseño, biodigester anaerobio, residuos sólidos, residuos de matadero.

ABSTRACT

The main focus of the work consists on design a first-generation anaerobic system to treat the solid wastes generated in the UEB Cárnico Bayamo, and the biogas production. As methodology of design was used the designing sequence of the fixed dome bio-digesters of the GBV type, which was drawn using the software SolidWorks 2014. With this system an adequate alternative is intended to generalize of sustainable and cost-reducing way the biogas production in the factories that process meat. For the design, the data of the animal's slaughter between the

years 2011 – 2014 were used, in order to determine the quantity of organic solid matter that daily is generated in the factory. Like proposal of the work, 2 bio-digesters construction of 47.5 m³ are necessary, obtaining that a daily biogas volume value of 15 m³.

Key words: design, anaerobic biodigestor, solid wastes, slaughterhouses

INTRODUCCIÓN

El incremento de los residuos orgánicos generados por el desarrollo de la sociedad, ha motivado a la comunidad científica a buscar métodos seguros y efectivos para el tratamiento adecuado de éstos residuales. Debido a las actuales y rigurosas legislaciones ambientales, el sector industrial está obligado a buscar alternativas de tratamiento para sus residuales. En los centros de procesamiento de cárnicos se producen grandes cantidades de residuales biodegradables. El potencial contaminante de éstos residuales incluyen la contaminación del medio ambiente por patógenos, putrefacción, y emisiones de amonio y metano (Nasir et al., 2012).

Varios estudios han demostrado la aplicabilidad de la digestión anaerobia para la producción de energía y el tratamiento de los residuales generados en las plantas procesadoras de cárnicos (Salminen y Rintala, 2002). La digestión anaerobia es una técnica atractiva, ya que tiene un alto potencial de tratamiento de los residuos orgánicos; y ha tenido un creciente auge en los últimos años por ser una solución económicamente factible. Al mismo tiempo, la digestión anaerobia tiene varios beneficios ambientales, los que incluyen: la producción de energía renovable en forma de biogás, la posibilidad de recirculación de nutrientes y la reducción de la contaminación (Aiyuk et al., 2006; Demirbas et al., 2011; Rao y Baral, 2011; T. Zhang et al., 2013; Y. Zhang et al., 2012).

La tecnología del biogás, que es una limpia y renovable forma de energía, es un buen sustituto (especialmente en las zonas rurales) de las fuentes convencionales de energía (combustibles fósiles) (Yadvika et al., 2004). La composición típica del biogás es 55 - 70 % de metano (CH₄), 30 - 45 % de dióxido de carbono (CO₂), 0 - 2 % de nitrógeno (N) y trazas de otros compuestos, como por ejemplo el sulfuro de hidrógeno, denominado ácido sulfhídrico (H₂S). Entre estos compuestos, el metano es el más importante desde el punto de vista de combustión. Es una invaluable fuente de energía renovable, pero también es un importante gas de efecto invernadero. El metano producido en el proceso de digestión anaerobia de los estiércoles

presenta entre 4800 – 6700 kcal m⁻³, el cual es cercano a los 8900 kcal m⁻³ obtenida con la energía del metano puro (Rasi et al., 2007).

El biogás puede ser utilizado como combustible para los motores de combustión interna, las turbinas de gas, las celdas de combustible, los calentadores de agua, calentadores industriales, entre otros muchos procesos. También, el biogás puede ser utilizado como combustible para la generación de electricidad, donde la eficiencia de conversión global está alrededor de 10 - 16 % (Demirbas et al., 2011).

Los requerimientos principales para el apropiado diseño de un biodigestor anaerobio, en el cual ocurre el proceso de tratamiento anaerobio de los residuos, es que deben permitir una adecuada carga orgánica volumétrica (COV) aplicada al reactor, un corto tiempo de retención hidráulica (TRH) y producir el máximo volumen posible de metano. También, otros factores como el mezclado, el número de tanques y la temperatura, en conjunto con el sustrato a degradar, forman también bases fundamentales en el diseño (Nizami y Murphy, 2010).

Aunque comúnmente los biodigestores se construyen con bloques de concretos o con ladrillos de barro, existen otras alternativas favorables que puedan simplificar su construcción, los costes globales y su mantenimiento (Ward et al., 2008). Actualmente existen varios tipos de biodigestores anaerobios para la producción de biogás, y su diseño está determinado por el tipo de residuo a tratar. Para los residuos sólidos o semi-sólidos, tales como los estiércoles y el rumen, el tipo de reactor que más se utiliza es el biodigestor en “batch” o por lotes. Este diseño se basa en colocar el sustrato en un biodigestor, con un tiempo de retención hidráulico fijo (entre 20 – 30 días), y pasado ese período se extrae el sustrato digerido (Abbasi et al., 2012).

Actualmente existen varios programas informáticos de diseño mecánico, entre los cuáles se encuentra el SolidWorks. El paquete SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para el sistema operativo Microsoft Windows. El programa permite modelar piezas y conjuntos, y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información sea necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

La UEB Bayamo de la Empresa Cárnica Granma, perteneciente al Grupo Empresarial de la Industria Alimentaria (GEIA), se dedica principalmente al sacrificio de ganado vacuno y porcino

para la producción de carnes y productos cárnicos; entre estos últimos se incluyen la elaboración de picadillo, hamburguesas, embutidos, masa de croquetas, entre otros. Los residuales líquidos generados en el proceso productivo contienen: sangre, orina, pequeñas partículas de carne, restos de tejidos y alimentos contenidos en el interior del estómago de los animales sacrificados; así como restos de las materias primas utilizadas en la elaboración de los diferentes conformados (condimentos, grasas vegetales, harina, entre otros).

La inevitable incorporación en menor o mayor medida a la red de evacuación de los elementos antes mencionados, así como el significativo número de microorganismos patógenos, bacterias de una enorme variedad de especies, protistas y helmintos, les confieren un elevado carácter infeccioso a estas aguas residuales. Por otro lado, se hace necesaria la utilización de grandes volúmenes de agua para garantizar la higienización de los locales (pisos y paredes), equipos y envases de las líneas de producción; aparejado con los problemas en el sistema hidráulico (averías en las tuberías y válvulas defectuosas).

Debido a esto, el consumo de agua de la empresa se encuentra en el orden de $2,60 - 3,20 \cdot 10^3$ m³ mensuales (aproximadamente 106,7 m³ diarios), siendo generados como aguas residuales entre 2470 - 3040 m³ mensuales (aproximadamente 101,3 m³ diarios) (GEOCUBA, 2013).

Las aguas residuales generadas por el Establecimiento Cárnico de Bayamo se caracterizan por presentar altas concentraciones de materia orgánica, expresada en función de los aceites y grasas, DBO₅ y DQO. La entidad cuenta actualmente con un sistema de tratamiento compuesto por 4 lagunas de oxidación; sin embargo, continuos estudios de la efectividad del sistema han revelado que los vertimientos de los efluentes tratados no cumplen los límites máximos permisibles promedio establecidos por la NC 27: 1999, la cual regula los parámetros de vertimiento de las aguas al río Bayamo. Entre las condiciones de infraestructura que condicionan el inadecuado manejo de los residuales líquidos industriales, se encuentran las siguientes (GEOCUBA, 2013).

El deterioro del sistema de pre-tratamiento, permite separar los materiales sólidos y las grasas por su naturaleza o tamaño; los cuáles originan problemas en las etapas posteriores del tratamiento debido a las elevadas concentraciones reportadas en las aguas residuales que interfieren con los tratamientos posteriores. La ineficiencia del órgano de tratamiento existente, no es suficiente para remover las altas concentraciones de contaminantes (grasas, materia orgánica) reportadas en el efluente industrial.

Además, influyen en su baja eficiencia:

- La poca capacidad en correspondencia con el caudal de aguas residuales y la falta de limpieza (extracción de natas y sólidos).
- Sobreconsumos de agua por las numerosas averías en el sistema hidráulico y el uso de mangueras sin dispositivos para regular el flujo, el cual favorece el incremento del caudal de las aguas residuales.
- El actual sistema de tratamiento, compuesto por 4 lagunas de oxidación, no cumple con los parámetros máximos permisibles para el tratamiento de los residuales generados del procesamiento de cárnicos en la UEB Bayamo.

Un reciente estudio realizado por Guardia-Puebla et al. (2017) demostró la potencialidad de obtener biogás a partir de estos residuales, es necesario diseñar un sistema de tratamiento integral de éstos residuales. Por tanto, el objetivo de este trabajo es diseñar un biodigestor anaerobio de primera generación, que forma la primera etapa de un sistema integral y eficiente de tratamiento de los residuos sólidos generados en la UEB Cárnico Bayamo, usando el programa de diseño SolidWorks.

POBLACIÓN Y MUESTRA

Caracterización de la UEB Cárnico Bayamo.

La UEB "Bayamo " de la Empresa Cárnica Granma, está ubicada en la carretera Central vía Manzanillo, en la ciudad de Bayamo. En la entidad se efectúa el sacrificio de ganado bovino y porcino, además de la elaboración de productos como carnes en conservas y masas cárnicas, por lo que se genera un volumen considerable de desperdicios de origen orgánico que se deposita en el vertedero municipal de comunales o en el sistema de tratamiento de residuales líquidos compuesto por 4 lagunas de oxidación.

En los estudios precedentes se describen de manera detallada el sistema de evacuación y tratamiento de las aguas residuales generadas por la UEB (GEOCUBA, 2013). El agua de la cuarta laguna es de color verde intenso por la presencia de algas. Al igual que las demás, muestra síntomas de erosión y deterioro por las personas que transitan por la zona y el pastoreo de animales.

Aunque el volumen de aguas residuales que ingresa a la primera laguna es considerablemente alto y la evaporación pueda ser elevada, el flujo desde la primera laguna hasta la cuarta laguna,

disminuye notablemente hasta el punto que actualmente la cuarta laguna, no se encuentra vertiendo al cuerpo receptor. Esto demuestra que el sistema puede estar infiltrando parte del residual en el manto freático, contaminando el acuífero de la zona (GEOCUBA, 2013). Como la empresa está ubicada en las márgenes del río Bayamo, se está contaminando éste. Una evidencia es el crecimiento excesivo de Jacintos de Agua en el cauce del río, debido al aumento de las concentraciones de nutrientes, vertidos por los residuales de la empresa.

Residuos generados.

Los residuales generados en la entidad contienen: sangre, orina, pequeñas partículas de carne, restos de tejidos y alimentos contenidos en el interior del estómago de los animales sacrificados; así como restos de las materias primas utilizadas en la elaboración de los diferentes conformados (condimentos, grasas vegetales, harina, entre otros). Las áreas de mayor influencia en la generación de residuales son las de sacrificio y preparación, debido a la gran cantidad de agua que se emplea en los procesos productivos que desarrollan: lavado de los animales, productos y subproductos, instrumental de proceso, envases y los locales implicados.

Otra área importante de generación de residuos es en los corrales, donde con agua se recolecta el estiércol producido por los animales. Éste estiércol vierte a un registro, que también está conectado al sistema de evacuación de la unidad.

Metodología de diseño de los biodigestores de cúpula fija.

Para el cálculo de los parámetros de diseño de un biodigestor anaerobio es necesario conocer los datos de entrada, y los que deben ser calculados. Los datos de entrada necesarios para el diseño se listan a continuación:

- Cantidad de biomasa diaria generada; M_d (kg d^{-1}).
- Tasa de dilución; N (l kg^{-1})
- Productividad de biogás; Y ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$).
- Tiempo de retención hidráulica, TRH (d).
- Coeficiente de contención de gas, k .

Los parámetros a calcular son los siguientes:

- Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua); S_d (kg d^{-1}).

- Volumen del biodigestor, V_{biodig} (m^3).
- Capacidad de producción de biogás, G ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$).
- Volumen de contención del biogás, (gasómetro y/o cúpula del biodigestor), $V_{\text{biogás}}$ (m^3).
- Volumen del tanque de compensación, V_{tc} (m^3).

Metodología de cálculo de los parámetros principales de un biodigestor GBV.

Volumen diario de material (residual y agua).

La cantidad diaria de materia de entrada (S_d), no es más que la suma del residual y la dilución de la biomasa (residual y agua).

$$S_d = (1 + N) \cdot M_d \quad [\text{m}^3 \text{d}^{-1}] \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

- N : Factor de dilución. Para este estudio se utilizó un valor de 1:3.
- M_d : Cantidad de material (residuo) (kg)

Volumen del biodigestor.

El volumen del biodigestor (V_{biodig}) se calcula teniendo en cuenta el volumen diario material (S_d) que entra al biodigestor y el tiempo de retención hidráulico (TRH), donde éste último fue ajustado a 30 días:

$$V_{\text{biodig}} = S_d \cdot \text{TRH} \quad [\text{m}^3] \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Capacidad de producción de biogás del biodigestor.

La capacidad de producción (G) se calcula a través de la productividad específica de biogás de los residuales:

$$G = M_d \cdot Y \quad [\text{m}^3 \text{d}^{-1}] \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

- Y : Productividad específica de biogás ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$).

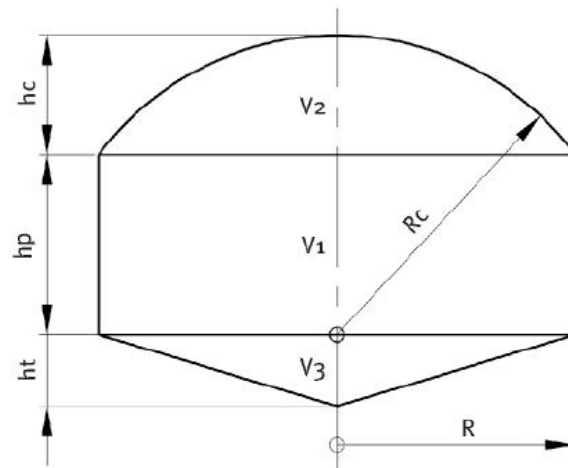
- Volumen de contención de gas.

$$V_{\text{biogás}} = k \cdot G \quad [m^3 d^{-1}] \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Por tanto, sustituyendo G en la ecuación 2.3, se tiene que:

$$V_{\text{biogás}} = k \cdot M_d \cdot Y \quad [m^3 d^{-1}] \quad (\text{Ec. 2.5})$$

El volumen efectivo del tanque de compensación es exactamente el mismo volumen de almacenamiento del biogás, por lo que sus parámetros geométricos dependen de la figura geométrica a la cual corresponda su estructura sin variar la altura, para la cual se han realizado los cálculos, y esta define la presión máxima del biogás en la planta. Una vez definido el volumen total del biodigestor, sobre la base del volumen diario de residual y el tiempo de retención hidráulica, se realiza el dimensionamiento del mismo. Un resumen de la metodología de cálculo a seguir para el diseño de un biodigestor GBV se muestra en la Figura 1.



U: Unidad
 hc: Altura de la cúpula
 hp: Altura de la pared
 R: Radio básico
 Rc: Radio de la cúpula
 D: Diámetro del cilindro
 ht: Altura del cono base

Proporciones

$R_c = 5 \cdot U$
 $D = 8 \cdot U$
 $hc = 2 \cdot U$
 $hp = 3 \cdot U$
 $ht = 0,15 \cdot D$

Unidad proporcional
 $U = R/4$

La constante 1,121 es válida para la unidad de medida dada en metro.

Volumen del digestor
 $V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 = R^3 \cdot \pi \cdot 1,121$

Volúmenes parciales

$V_{1_{cilindro}} = R^2 \cdot hp \cdot \pi$
 $V_{2_{segmento\ esférico}} = hc^2 \cdot \pi \cdot [Rc \cdot (hc/3)]$
 $V_{3_{cono\ base}} = R^2 \cdot \pi \cdot (ht/3)$

Radio básico

$$R = \sqrt[3]{V_{tot} / (\pi \cdot 1,121)}$$

Figura 1. Metodología de cálculo a seguir para el diseño de un biodigestor GBV (Guardado-Chacón, 2007).

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Evaluación de las potencialidades.

Al realizar el análisis de los datos mensuales promedio recolectados durante 4 años sobre la cantidad de animales sacrificados en la entidad (Tabla 1), y en el procesamiento de los mismos, se obtuvieron las cantidades promedio de la biomasa generada a tratar, y se muestran en la Tabla 2. En esta tabla se observan los residuos por tipo, a partir de los animales que dan origen a estos; no obstante, para la utilización de estos datos en el diseño del biodigestor se considera el residual generado por cada uno de los tipos de animales en el matadero, en la etapa de mayor productividad, la cual fue el año 2014.

Años	2013	2014	2015	2016
------	------	------	------	------

Meses	vacuno	cerdos	vacuno	cerdos	vacuno	cerdos	vacuno	cerdos
Enero	838	1506	725	1761	746	2824	742	3340
Febrero	827	2414	793	2150	740	3342	862	3532
Marzo	857	2633	506	2119	698	2980	801	3778
Abril	682	2860	598	2958	514	3610	559	3789
Mayo	796	2764	458	1721	538	3481	555	3944
Junio	515	3010	533	3023	698	3469	603	3652
Julio	662	3175	842	3978	758	4173	699	3296
Agosto	907	3256	844	3642	983	3640	833	3097
Septiembre	1032	2861	951	3492	1028	4202	863	4004
Octubre	1232	4302	1086	4653	1221	3990	1180	5789
Noviembre	1098	4381	1494	4256	1221	3962	1977	6292
Diciembre	1154	4462	1373	3675	1564	3779	1767	6171
Promedio	10600	37624	10203	37428	10709	43452	11441	50684

Tabla 1: Cantidad de animales sacrificados por año en el periodo (2011-2014)

Tipo de	Cantidad (m³)
Vacuno	276,8
Porcino	88,7
Total	365,5

Tabla 2: Biomasa anual para la producción de biogás generada en la UEB Cárnicos Bayamo

Por tanto, en la UEB Cárnico Bayamo se generan, aproximadamente, un total de 276,8 m³ diarios de residual de origen vacuno y 88,7 m³ de origen porcino. Por tanto, un volumen aproximado, de 1 m³ diario de materia sólida orgánica, fue utilizado para el diseño de un biodigestor anaerobio de cúpula fija, tipo GBV, para la producción de biogás.

Diseño del biodigestor anaerobio para la producción de biogás.

Los cálculos para el diseño del biodigestor anaerobio se realizaron con el empleo de la metodología expuesta en el capítulo anterior. Por tanto, y considerando que se realiza una

dilución de la materia orgánica de 1:3 (una parte de residuo sólido y tres partes de agua) se tiene una cantidad de materia diaria aproximada de $3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, con un tiempo de retención de 30 d, el volumen total del biodigestor será de 90 m^3 . Una vez calculado el volumen total necesario para el sistema, se procedió a la selección del biodigestor con volúmenes prototipos, los cuáles comprenden volúmenes de 10 m^3 , 14 m^3 , $22,5 \text{ m}^3$, $42,5 \text{ m}^3$ y $47,5 \text{ m}^3$ (Guardado-Chacón, 2007).

Con los volúmenes de los biodigestores obtenidos mediante el cálculo, y utilizando los diseños prototipos, se procedió a la selección de los volúmenes reales y sus parámetros constructivos, por lo que se decidió la selección de dos plantas de $47,5 \text{ m}^3$, para garantizar un mejor funcionamiento de las mismas, además de poder dar mantenimientos, sin que se afecte el proceso de producción de biogás y de tratamiento de los residuales. Una representación en 3 D del biodigestor anaerobio propuesto de $47,5 \text{ m}^3$ se muestra en la Figura 2.

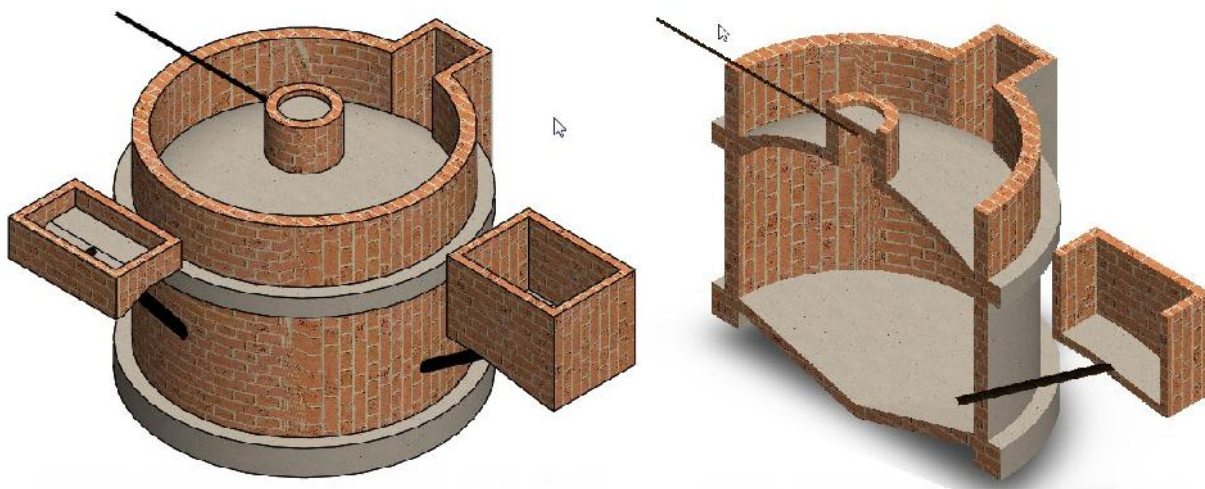


Figura 2. Representación en 3 dimensiones del biodigestor anaerobio propuesto de $47,5 \text{ m}^3$.

Producción de Biogás.

La producción de biogás se determinó aplicando la ecuación que a continuación se relaciona, obtenida a partir del estudio de biodegradabilidad anaerobia de los residuales de la entidad (Guardia-Puebla et al., 2017).

$$\begin{aligned} \text{Producción de metano} = & 1501 \text{ estiércol} + 948.1 \text{ residuos sólidos} + 560.3 \text{ aguas residuales} - \\ & 1962 \text{ estiércol} * \text{residuos sólidos} - 1.37 \cdot 10^4 \text{ estiércol} * \text{residuos sólidos} * \text{aguas} \\ & \text{residuales} \end{aligned}$$

Después de aplicar la ecuación se obtuvo que la producción predicha diaria de biogás a obtener, a partir del tratamiento de los residuales sólidos de la UEB Cárnicos Bayamo en reactores del tipo chino GBV, es de aproximadamente 15 m³ diarios, con un 70 % de concentración de metano.

CONCLUSIONES

1. En la UEB Cárnicos Bayamo se genera diariamente un aproximado de 1 m³ de residual sólido, del cual el 90 % corresponde a residual de origen rumial.
2. El tratamiento y valorización de los residuales sólidos, en biodigestores anaerobios de primera generación, genera alrededor de 15 m³ de biogás diario con una concentración de 70 % de metano.
3. Para tratar estos residuales se necesitan dos reactores de primera generación del tipo GBV de 47, 5 m³, constituyéndose estos en la primera etapa de un sistema integrado de tratamiento de residuales de la UEB Cárnicos Bayamo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Abbasi, T., Tauseef, S. M., y Abbasi, S. A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3228-3242. ISSN: 1364-0321,doi:
2. Aiyuk, S., Forrez, I., deLieven, K., vanHaandle, A., y Verstraete, W. (2006). Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates - A review. *Bioresour. Technol*, 97(17), 2225-2241. ISSN: 0960-8524,doi: 10.1016/j.biortech.2005.05.015
3. Demirbas, M. F., Balat, M., y Balat, H. (2011). Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management*, 52, 1815-1828. ISSN: 0196-8904,doi: <http://10.1016/j.enconman.2010.10.041>
4. GEOCUBA. (2013). Caracterización de residuales líquidos UEB "Bayamo", Empresa Cárnica Granma. Bayamo, Granma: Grupo Empresarial GEOCUBA, Agencia Granma.
5. Guardado-Chacón, J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. Ciudad de la Habana, Cuba: Editorial Cubasolar.

6. Guardia-Puebla, Y., Herrera-Robledo, M., Rodríguez-Ponce, Y., Rodríguez-Pérez, S., y Pérez-Cedeño, M. (2017). Statistical modeling of the methane production from slaughterhouse wastes in anaerobic co-digestion. *British Journal of Environment & Climate Change*, 7(1), 13-25. ISSN: 2231-4784,doi: <http://dx.doi.org/10.9734/BJECC/2017/29741>
7. Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M., y Omar, R. (2012). Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 95, 321-329. 10.1007/s00253-012-4152-7
8. Nizami, A.-S., y Murphy, J. D. (2010). What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1558-1568. ISSN: 1364-0321,doi:
9. Rao, P. V., y Baral, S. S. (2011). Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge. *Chemical Engineering Journal*, 172, 977-986. ISSN: 1385-8947,doi: <http://10.1016/j.cej.2011.07.010>
10. Rasi, S., Veijanen, A., y Rintala, J. (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy*, 32, 1375-1380. ISSN: 0360-5442,doi:
11. Salminen, E., y Rintala, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review. *Bioresource Technology*, 83, 13-26.
12. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., y Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99, 7928-7940. ISSN: 0960-8524,doi: <http://10.1016/j.biortech.2008.02.044>
13. Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., y Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - a review. *Bioresource Technology*, 95, 1-10. 10.1016/j.biortech.2004.02.010
14. Zhang, T., Liu, L., Song, Z., Ren, G., Feng, Y., Han, X., y Yang, G. (2013). Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues. *PLoS ONE*, 8(6), 1-7. ISSN: e66845,doi: 10.1371/journal.pone.0066845
15. Zhang, Y., Banks, C., y Heaven, S. (2012). Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams. *Journal of Environmental Management*, 104, 166-174. ISSN: 0301-4797,doi: 10.1016/j.jenvman.2012.03.043