



<https://eqrcode.co/a/IqRGcH>

REVIEW | REVISIÓN

Biogas Plants in Germany: Revision and Analysis

Plantas de biogás en Alemania. Revisión y análisis

Dr.C. Carlos M. Martínez-Hernández^I, MSc. Yaser García-López^{II}, Dr.Sc. Hans Oechsner^{III}

^I Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara. Cuba.

^{II} Lab. LABIOFAM. Santa Clara. Villa Clara, Cuba

^{III} University of Hohenheim, State Institute of Agricultural Engineering and Bioenergy, Germany

ABSTRACT. The present research was developed considering the peak of pig production in Cuba and the importance of food production for human and animal consumption. It also answers to the need of fuel saving and of obtaining that production with minimum expenses from raw materials of national origin. This work is presented in three parts. Firstly, the technologies and methods used in Germany for biogas production are described. There, great-format plants are used which are adequate to generate heat, electricity and an organic fertilizer. Secondly, the particularities of these biogas plants are approached. And finally, their possible use in Cuba is analyzed. As a result, the study shows the state of the art in the use of biogas facilities of great-format to international and national scale, which is used to obtain heat, electricity and bio-fertilizers, minimizing the aspects of environmental contamination, in correspondence with UN Agenda 2030 of Sustainable Development, also adopted in Cuba.

Keywords: Biogas facilities, production of electricity, heat and bio-fertilizers.

RESUMEN. Teniendo en cuenta el auge de la producción porcina en Cuba y la importancia que tiene hoy en día el ahorro de combustible y la producción de alimentos con destino humano y animal; así como su obtención con los mínimos gastos y utilizando materias primas de procedencia nacional. Este trabajo se presenta en tres partes, en las cuales: primeramente se describen las tecnologías y los métodos utilizados en Alemania para la producción de biogás utilizando plantas de gran formato que propician: generar calor, electricidad y un fertilizante orgánico. Una segunda parte donde se aborda las particularidades de estas plantas de biogás. Finalmente, una tercera parte donde se analiza su posible utilización en el caso cubano. Como resultado del mismo, se muestra el estado del arte en la utilización de instalaciones de biogás de gran formato a escala internacional y nacional, los cuales se utilizan para obtener calor, electricidad y biofertilizantes, minimizando los aspectos de contaminación medioambiental, lo cual está en correspondencia con la agenda de desarrollo sostenible de nuestro país para la década 2020-2030.

Palabras clave: Instalaciones de biogás, producción de electricidad, calor y biofertilizantes.

INTRODUCTION

In accordance with the Guide on Biogas, from production to the use, 2013 (Guía sobre el biogás, 2013), the technology of the plant covers a very wide spectrum. Practically, limits do not exist in component terms and in equipment combinations. Consequently, technical examples are given in this paper to illustrate articles about equipment. However, it should be noticed that it is always necessary to make a particular expert analysis for each case about the convenience and adaptation of the capacity of plants and systems.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Guía sobre el biogás. Desde la producción hasta el uso, 2013 (Guía sobre el biogás, 2013). La tecnología de la planta para la recuperación del biogás (plantas de biogás) cubre un espectro muy amplio. Prácticamente no existen límites en términos de componente y de combinaciones de equipamiento. En consecuencia, aquí se utilizan ejemplos técnicos a manera de ilustración de los artículos específicos del equipamiento. Sin embargo, debe notarse que siempre es necesario hacer un análisis experto

¹ Author for correspondence: Carlos M. Martínez-Hernández, e-mail: carlosmh@uclv.edu.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1853-1195>

Received: 14/10/2020.

Approved: 20/09/2021.

Dry Matter Content of Substrates for the Digestion: The consistency of the substrate depends on its dry matter content. This is the reason why the biogas technology is subdivided in processes of humid and dry digestion. The humid digestion uses substrate of consistency susceptible of pumping. The dry digestion uses piling substrate. The Law of Renewable Energy Sources (EEG) of 2004, specifies a content of dry mass of at least 30% for mass in the feed stock and a rate of organic load of at least 3,5 kgVS / (m³.d) in the digester. The dry matter content in the liquid of the digester in the humid digestion process can be until 12% of the mass. Generally, a limit of 15% of the mass to pump the medium is predetermined, but the value is qualitative and it is not viable for all the feed stocks. Some substrates that have a distribution of finely dispersed particles and discharges proportions of dissolved substances can even be pumped when the dry matter content reaches 20% of the mass. This is the case of the residuals of discharged dispersed feed stock of transports in tanks. Other substrates like fruit and vegetables peels are piling when the dry matter content (DM) is 10 or 12% of the mass.

Feeding Type: The load or feeding regime of the biogas recovery plant determines greatly the readiness of fresh substrate for the microorganisms and it has a corresponding effect in the biogas generation. Wide distinctions are made among the continuous, semi-continuous and intermittent supply.

Continuous and Semi-Continuous Supply: An additional distinction can be made between the methods of continuous flow and a combination of continuous flow with tank tampon. The feeding method that uses only the tank tampon is not mentioned here because the current economic considerations and engineering of processes virtually impede its use, although it is still mentioned in the literature. In contrast with the continuous supply, the semi-continuous supply implies adding to the digester, a not fermented lot of substrate at least once for working day. Additional advantages exist in adding the substrate in several small lots along the day.

In Germany, at the end of 2017, there were more than 8000 biogas plants of medium and great format in production. Using the co-fermentation of cow and pig excretes, with substrates of agricultural origin, standing out for these ends varieties of energy corn, previously fermented in bunker silos, bio-products of the food industry and canteen residuals.

According to Suarez *et al.* (2018), in the sectors of Ministry of Agriculture (MINAG), Ministry of Food Industry (MINAL) and Ministry of Sugar Industry (AZCUBA), the potential of biogas production is of 674 609 m³/day, mainly from pig and poultry production. This potential means a production of energy of 1 477 394 MWh/year, equivalent to 132 856 t of diesel whose import costs Cuba 48 615 065 USD. On the other hand, the emissions avoided by the substitution of this fossil fuel by biogas are considered in 440 778 t of CO₂eq/year.

In Cuba, according to NTV, 2020, cited by Oechsner *et al.* (2020), 3000 biogas plants of small format and 70

caso por caso de la conveniencia y adaptación de la capacidad de plantas y sistemas.

Contenido de materia seca del sustrato para la digestión:

La consistencia del sustrato depende de su contenido de materia seca. Ésta es la razón para que se subdivida la tecnología de biogás en procesos de digestión húmeda y de digestión seca. La digestión húmeda usa sustratos de consistencia susceptible de bombeo. La digestión seca usa sustratos apilables. La Ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG) de 2004, especifican un contenido de masa seca de al menos de 30% por masa en el material de alimentación y una tasa de carga orgánica de al menos 3,5 kg VS/ (m³.d) en el digester. El contenido de materia seca en el líquido del digester en el proceso de digestión húmeda puede llegar hasta el 12% de la masa. Por regla general, se fija un límite de 15% de la masa para bombear el medio, pero la cifra es cualitativa y no es viable para todos los materiales de alimentación. Algunos sustratos que tienen una distribución de partículas finamente dispersadas y altas proporciones de sustancias disueltas se pueden bombear incluso cuando el contenido de materia seca llega al 20% de la masa. Este es el caso de los residuos de material de alimentación disperso descargado de transportes en tanques. Otros sustratos como cáscaras de frutas y verduras, en cambio, son apilables cuando el contenido de DM (MS) llega al 10 o 12% de la masa.

Tipo de alimentación: El régimen de carga o alimentación de la planta de recuperación de biogás determina en gran medida la disponibilidad de sustrato fresco para los microorganismos y tiene un efecto correspondiente en la generación de biogás. Se hace distinciones amplias entre la alimentación continua, semi-continua e intermitente.

Alimentación continua y semi-continua: Se puede hacer una distinción adicional entre los métodos de flujo continuo y una combinación de flujo continuo con tanque tampón. El método de alimentación que usa solamente el tanque tampón no se menciona aquí porque las actuales consideraciones económicas y de ingeniería de procesos virtualmente impiden su utilización, aunque todavía es mencionado en la literatura. En contraste con la alimentación continua, la alimentación semi-continua implica añadir al digester un lote no fermentado de sustrato al menos una vez por día de trabajo. Existen ventajas adicionales en añadir el sustrato en varios lotes pequeños a lo largo del día.

En Alemania a finales del 2017, estaban en producción más de 8000 plantas de biogás de mediano y gran formato. Utilizando la co-fermentación de excretas vacunas y porcinas, con sustratos de origen agrícola, destacándose para estos fines variedades de maíz energético, previamente fermentado en silos de trincheras, subproductos de la industria alimenticias y residuales de cantina. De acuerdo con Suárez *et al.* (2018), en los sectores del Ministerio de la Agricultura (MINAG), del Ministerio de la Industria Alimenticia (MINAL) y del Ministerio de la Industria Azucarera (AZCUBA), el potencial de diario de producción de biogás es de 674 609 m³, en lo cual destacan la producción porcina y avícola; este potencial significa una producción de energía de 1 477 394 MWh/año, equivalente a 132 856 t de diésel, cuya importación cuesta a Cuba 48 615 065 USD. Por otra parte, las emisiones evitadas por la sustitución de este combustible fósil por biogás se estiman en 440 778 t de CO₂eq/año.

plants of medium format exist in the state and private sectors. In their majority, they use the residual (excrete) of the pig and cow production in mono-fermentation (excrete+water without the addition of other substrate). Due to the potential of existent residuals at country level (in the cattle, poultry and pig branches) it is considered that it is possible to elevate the number in next year's up to 7000 biogas facilities. If the above-mentioned were achieved, the perspective agenda to develop renewable sources of energy for the decade 2020-2030 in the country would be supported, since Cuba has foreseen to improve its energy matrix giving 24% participation to the renewable sources of energy in that decade.

The pig production of Villa Clara province stands out at national level in this activity. In this county, more than 400 biodigesters of small format have been installed at state and private level, in order to give treatment to these residual and to obtain biogas, however some problems related with the underemployed of the biogas facilities, as for the electricity production, the use and final disposition of the effluents and the little use of these as organic fertilizer have gotten the attention of the sanitary authorities of the territory. In works previous of Francesena (2016); Martínez *et al.* (2017); Martínez *et al.* (2017); Martínez & Francesena (2018), it has been meditated on the control parameters and monitoring of biogas plants of medium and small format, the environmental impact caused by the effluents of these plants, the non-execution of the Cuban norm of pouring NC-27:12 (2012) and the underemployed of these effluents like organic fertilizer. In the face of the possibility of creating biogas facilities of great format in the future, this work has as **objective** to present the state of the art in this thematic.

This work has been elaborated taking bibliographical references from 1998 to 2020. The mentioned fundamental sources are of German origin, although works carried out in Cuba are also mentioned. The geographical places referred are from Germany and Cuba. The selection approaches kept in mind in this work have been related with the technologies and uses of biogas facilities of great format.

DEVELOPMENT OF THE TOPIC

In Germany several methods are used for the biogas production. Some of these are presented next:

Method of Continuous Flow: In the past, most of systems of biogas recovery were built to operate on the principle of continuous flow. Substrate is pumped several times a day from a pre-digester tank or from a pre-digester well to the reactor. The same quantity of fresh substrate that is added to the digester is expelled or extracted from the tank of digested storage (Figure 1).

Process of Combination of Continuous Flow and Tampon Tank: The biogas recovery plants that operate the combination of continuous flow/tank-tampon, also use facilities covered of digested storage. This allows capturing and using the product of the biogas digestion. The tank of digested storage works as a tank tampon. The current above the unit of this tank tampon, that is part of the plant, is a digester of

En Cuba según el NTV, 2020, citado por Oechsner *et al.* (2020) existen 3000 plantas de biogás de pequeño formato y 70 plantas de mediano formato en los sectores estatales y privados. En su mayoría utilizan los residuales (excretas) de la producción porcina y vacuna en mono fermentación (excretas +agua sin la adición de otros sustratos). Debido al potencial de residuos existentes a nivel país (en la rama ganadera, avícola y porcina) se estima que es posible elevar la cifra en los próximos años hasta 7000 instalaciones de biogás. De lograrse lo anterior, se estaría apoyando el cumplimiento de la agenda del desarrollo perspectivas de las fuentes renovables de energía en el decenio 2020-2030 a escala de país, ya que Cuba tiene previsto mejorar su matriz energética dándole un 24% de participación a las fuentes renovables de energía en ese decenio.

La producción porcina de la provincia de Villa Clara se destaca a nivel nacional en esta actividad, en esta provincia se disponen más de 400 biodigestores de pequeño formato instalados a nivel estatal y privado, con el objeto de darle tratamiento a estos residuales y obtener biogás, sin embargo algunos problemas relacionados con la subutilización de las instalaciones de biogás, en cuanto a la producción de electricidad, el uso y disposición final de los efluentes y la poca utilización de estos como abonos orgánicos ha llamado la atención de las autoridades sanitarias del territorio. En trabajos anteriores de Francesena (2016); Martínez *et al.* (2017); Martínez *et al.* (2017); Martínez & Francesena (2018), 2018), se ha reflexionado sobre los parámetros de control y monitoreo de plantas de biogás de mediano y pequeño formato, el impacto ambiental provocado por los efluentes de estas plantas, el no cumplimiento de la norma cubana de vertimientos NC-27:12 (2012) y la subutilización de estos efluentes como bioabonos orgánicos. Ante la posibilidad de crear instalaciones de biogás de gran formato en el futuro, este trabajo tiene como **objetivo** presentar el estado del arte en esta temática.

DESARROLLO DEL TEMA

Este trabajo se ha elaborado tomando referencias bibliográficas enmarcadas en el período comprendido entre los años 1998 hasta 2020. Las fuentes fundamentales citadas son de origen alemán, aunque también se mencionan trabajos realizados en Cuba. Las localidades geográficas que aparecen en las citas están relacionadas con Alemania y Cuba respectivamente. Los criterios de selección tenidos en cuenta en este trabajo han estado relacionados con las tecnologías y usos de instalaciones de biogás de gran formato.

En Alemania se utilizan varios métodos para la producción de biogás. Algunos de estos se exponen a continuación:

Método de flujo continuo: En el pasado, la mayoría de sistemas de recuperación de biogás se construyeron para operar sobre el principio de flujo continuo. Se bombea sustrato varias veces al día de un tanque pre-digestor o de un pozo pre-digestor al reactor. La misma cantidad de sustrato fresco que se añade al digester se expele o se extrae del tanque de almacenamiento de digestato (Figure 1).

Proceso de combinación de flujo continuo y tanque tampón: Las plantas de recuperación de biogás que operan sobre la base de la combinación de flujo continuo/tanque-tampón también emplean instalaciones de almacenamiento de digestato cubiertas. Esto permite que se capture y utilice el producto pos digestión del biogás. El tanque de almacenamiento de digestato funciona como un tanque

continuous flow. If there were an urgent necessity of a great quantity of pre-digested substrate as fertilizer, substrate could be taken out from the digester of continuous flow. Figure 2 is a diagrammatic list of the process. The process allows a permanent production of gas. The time of staying inside the tank cannot be determined with accuracy due to the possibility of short circuits of the flow in the continuous digester of flows (Weiland & Rieger, 2001). This process is the most advanced at the present time. The investment expenses for the storage tank of the digested can be recovered from the incomes for extra yields of gas.

tampón. La corriente arriba de la unidad de este tanque tampón que es parte de la planta es un digester de flujo continuo. Si surge la necesidad de una gran cantidad de sustrato pre-digerido como fertilizante, se puede sacar sustrato del digester de flujo continuo. La Figura 2 es una lista diagramática del proceso. El proceso permite una producción permanente de gas. El tiempo de estadía no puede determinarse con exactitud debido a la posibilidad de cortocircuitos del flujo en el digester de flujos continuo (Weiland & Rieger, 2001). Este proceso es el más avanzado en la actualidad. Los gastos de inversión para el tanque de almacenamiento del digestato pueden amortizarse a partir del ingreso del rendimiento extra de gas.

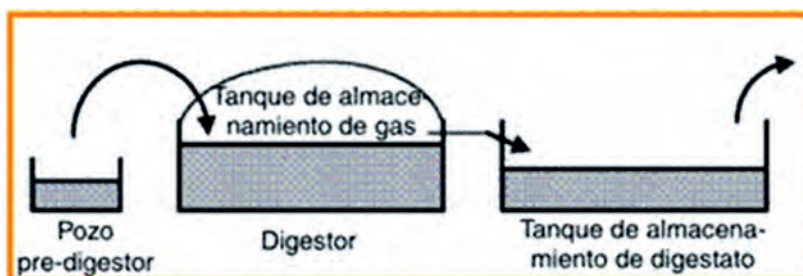


FIGURE 1. Outline of the continuous flowing process. Source: Weiland & Rieger (2001).

FIGURA 1. Esquema del proceso de flujo continuo. Fuente: Weiland & Rieger (2001).

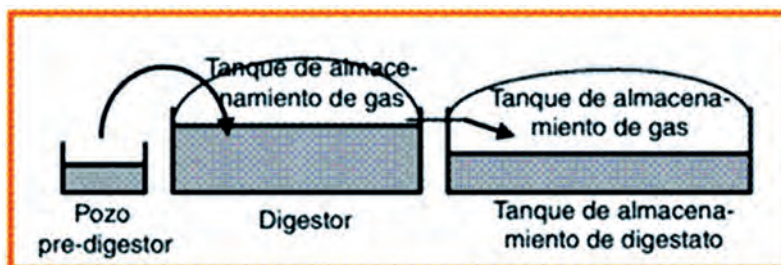


FIGURE 2. Outline of the combined process of continuous flow/tampón tank. Source: Weiland & Rieger (2001).

FIGURA 2. Esquema del proceso combinado de flujo continuo/tanque tampón. Fuente: Weiland & Rieger (2001).

Intermittent Feeding: The intermittent feeding, for lots, implies to fill the digester completely with fresh substrate and then to place a hermetic closure. The feed stock remains inside the tank until the selected time of staying passes, without adding or eliminating any substrate. When this time concludes, the digester is emptied and filled with a fresh lot of feed stock again, with the possibility that a small proportion of the digested can stay as material seed to inoculate the fresh substrate. The process of filling of the lot digester accelerates by placing a supply tank, with a recipient of discharge storage for the same purpose next to the exit. The intermittent feeding for lots is characterized by a rate of gas production that changes along the time. The production of gas begins slowly after the reactor has been filled, it reaches a pick in some days (depending on the substrate) and then it goes diminishing continually. As a unique digester, it cannot assure the constancy in gas production or the quality of gas, the filling up by stages of several digesters has to be adapted (method of filling of lots in battery) so that the net production is more homogeneous. The time of minimum staying is kept with accuracy. (Weiland & Rieger, 2001). The feeding for lots of unique digesters is not practical. The principle of the

Alimentación intermitente: La alimentación intermitente, por lotes, implica llenar por completo el digester con sustrato fresco y luego colocar un sello hermético. El material de alimentación permanece dentro del tanque hasta que pase el tiempo de estadía seleccionado, sin que se añada o elimine ningún sustrato durante este tiempo. Cuando el tiempo de estadía concluye, el digester se vacía y se vuelve a llenar con un lote fresco de material de alimentación, con la posibilidad de que una pequeña proporción del digestato pueda quedarse como material semilla para inocular el sustrato fresco. El proceso de llenado del digester de lote se acelera colocando un tanque de suministro, con un recipiente de almacenamiento de descargas para el mismo propósito en el lado de la salida. La alimentación intermitente por lotes se caracteriza por una tasa de producción de gas que cambia a lo largo del tiempo. La producción de gas comienza lentamente luego que se ha llenado el reactor, que alcanza un pico en algunos días (dependiendo del sustrato) y luego va disminuyendo continuamente. Como un digester único no puede asegurar la constancia de producción de gas o la calidad de gas, tiene que adaptarse el llenado por etapas de varios digestores (método de llenado de lotes en batería) para que la producción neta sea más homogénea. Se mantiene con exactitud el tiempo de residencia mínimo (Weiland & Rieger, 2001). Este pro-

feeding of lots in battery is used for the dry digestion, what is sometimes known as “digesters garages” or “digesters in modulate boxes.”

Number of Phases of the Process and Stages of the Process: A phase of the process is considered like the biological medium, hydrolysis phase or methane phase with specific conditions of the process as pH value and temperature. When the hydrolysis and the methane process happen in a unique tank, the utilized term is process management in unique phase. A process in two phases is that in which the hydrolysis and the methane process happen in separate tanks. Stage is the term that is used for the process tank, independently of the biological phase. As a consequence, the configuration of the plant with a well pre-digester, a digester tank and a tank of digested storage that is often found in agriculture, is of unique phase, but in three stages. The well open pre-digester as such is not a phase separated in it. The sealed recipient of retention or reception, on the other hand, is considered like a separate phase (hydrolysis phase). The main and secondary digesters belong both to the methane phase. Generally, the agricultural biogas recovery plants have a design of unique phase or two phases, being the plants of unique phase the more communes (Schulz & Eder, 2006).

Engineering of the Process: In general terms, independently of the operative principle, agricultural biogás plant can be subdivided in four different processing steps:

1. Manage of the substrate (delivers, storage, preparation, transport and feeding)
2. Recovery of the biogás
3. Storage of the digested, treatment and spread in the field
4. Storage, treatment and biogás use

ceso es el más avanzado en la actualidad. Los gastos de inversión para el tanque de almac. La alimentación por lotes de digestores únicos no es práctica. El principio de la alimentación de lotes en batería se utiliza para la digestión seca, lo que se conoce a veces como “garajes de digestores” o “digestores en cajas modulares”.

Número de fases del proceso y de etapas del proceso: Se entiende una fase del proceso como el medio biológico, fase de hidrólisis o fase de metanización con condiciones específicas del proceso tales como valor de pH y temperatura. Cuando ocurren la hidrólisis y la metanización en un tanque único, el término utilizado es gestión del proceso en fase única. Un proceso en dos fases es aquel en que la hidrólisis y la metanización ocurren en tanques separados. Etapa es el término que se utiliza para el tanque de proceso, independientemente de la fase biológica. En consecuencia, la configuración de la planta con un pozo pre-digester, un tanque digester y un tanque de almacenamiento de digestato, que se encuentra a menudo en la agricultura, es de fase única, pero en tres etapas. El pozo pre-digester abierto como tal no es una fase separada en sí misma. El recipiente sellado de retención o recepción, por otro lado, se considera como una fase separada (fase de hidrólisis). Los digestores principales y secundarios pertenecen ambos a la fase de metanización. Generalmente, las plantas agrícolas de recuperación de biogás tienen un diseño de fase única o de dos fases, siendo las plantas de fase única las más comunes (Schulz & Eder, 2006).

Ingeniería del proceso: En términos generales, independientemente del principio operativo, una planta de biogás agrícola puede subdividirse en cuatro pasos de procesamiento diferentes:

1. manejo del sustrato (entrega, almacenamiento, preparación, transporte y alimentación);
2. recuperación del biogás;
3. almacenamiento del digestato, tratamiento y esparcimiento en el campo;
4. almacenamiento, tratamiento y uso de biogás.

Los pasos individuales se muestran en mayor detalle en la Figura 3. Los cuatro pasos del proceso no son independientes entre sí.

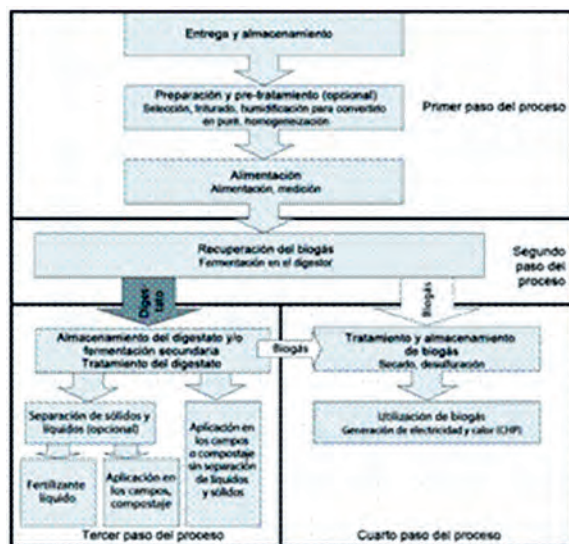


FIGURE 3. General process of biogas recovery. Source: Jäkel (1998).

FIGURA 3. Proceso general de recuperación del biogás. Fuente: Jäkel (1998).

DEVELOPMENT OF THE TOPIC

The individual steps are shown in Figure 3. The four steps of the process are not independent to each other. The link between steps two and four are particularly narrow because the step four generally provides the heat that is needed for the step two in the process. The treatment and use of the biogas that correspond to the step four are referred separated in Chapter 6. While Chapter 10 refers to digested processing and treatment (Guides on the biogas. From the production until the use, 2013) in *Guía sobre el biogás* (2013). The following information is related to the technology and the techniques used in steps 1, 2 and 3. The election of the processing equipment depends mainly on the nature of the available substrate. The sizes of all the plants and containers have to be based on quantities of substrate. The quality of the substrate (dry matter content, structures, source, etc.) is the decisive factor in terms of designing of process engineering. Depending on the composition of the substrate, it can be necessary to eliminate substances that interfere or to humidify them with extra liquid to obtain a capable mixture for pumping. If substances that require sanitation are utilized, the planning has to allow a sanitation stage. After pre-treatment, the substrate is transferred to the digester where it is fermented. The plants of humid digestion generally have a design of two stages and they operate under the principle of continuous flow. A design in two stages consists of a digester and a secondary digester. The substrate moves from the first digester, the primary one, to the secondary digester, where the most resistant substances can be bio-degraded. The digested is stored in sealed tanks of digested storage with biogas extraction or tanks open of digested and then it is generally discarded, spreading it as liquid fertilizer in agricultural soil. The biogas produced by the biodegradation of the feed stock is stored and purified. Generally, it is used for combustion in a combined unit of heat and energy (CHP) to co-generate electricity and heat. Figure 4 shows the most important components in the plant, the sub-assembling and the units of a plant of agricultural biogas recovery of unique stage for co-substrate with sanitation.

According to Oechsner & Lemmer (2007), already in the 2007, there were 3500 biogas plants in Germany with capacity to generate more than 1 GW of electricity. That shows clearly the German government's policy in this sphere, which reports electricity, heat and organic fertilizer. These plants can operate in mesophilic (37-42 °C) or thermophilic (46-55 °C) regime, in mono-fermentation and co-fermentation, being these last ones the most utilized. According to Oechsner & Lemmer (2007), the co-fermentation has the following advantages: it optimizes the relationship C/N, increases the biogas yield, influences in the quantity and quality of the biogas, stabilizes the process, adds value to the treatment of the residuals and closes the cycle of the nutrients. As disadvantages, these authors outline: risk of introducing toxic substances (industrial and municipal residuals) and pathogen organisms into the system.

DESARROLLO DEL TEMA

El vínculo entre los pasos dos y cuatro es particularmente estrecho porque el paso cuatro provee generalmente el calor que se necesita para el paso dos en el proceso. El tratamiento y uso del biogás que corresponden al paso cuatro se tratan por separado en el Capítulo 6. Mientras que en el Capítulo 10 se ocupa del procesamiento y tratamiento de digestato (*Guía sobre el biogás. Desde la producción hasta el uso, 2013*) en *Guía sobre el biogás* (2013). La información a continuación se relaciona con la tecnología y las técnicas empleadas en los pasos 1, 2 y 3. La elección del equipo de procesamiento depende principalmente de la naturaleza de los sustratos disponibles. Los tamaños de todas las plantas y contenedores tienen que basarse en cantidades de sustrato. La calidad del sustrato (contenido de materia seca, estructura, fuente, etc.) es el factor determinante en términos de diseño de ingeniería de proceso. Dependiendo de la composición del sustrato, puede ser necesario eliminar sustancias que interfieren o humedecerlas con líquido extra para obtener una mezcla apta para bombeo. Si se utiliza sustancias que requieren higienización, el planeamiento tiene que permitir una etapa de higienización. Luego del pre-tratamiento, se traslada el sustrato al digester donde se fermenta. Las plantas de digestión húmeda generalmente tienen un diseño de una o dos etapas y operan bajo el principio de flujo continuo. Un diseño en dos etapas consta de un digester y un digester secundario. El sustrato se mueve desde el primer digester, el primario, al digester secundario, donde las sustancias más resistentes pueden biodegradarse. Se almacena el digestato en tanques sellados de almacenamiento de digestato con extracción de biogás o tanques abiertos de digestato y luego generalmente se descarta esparciéndolo como fertilizante líquido en tierra agrícola. El biogás producido por la biodegradación del material de alimentación se almacena y purifica. Generalmente, se usa para combustión en una unidad combinada de calor y energía (CHP) para co-generar electricidad y calor. La Figura 4 muestra los componentes más importantes de la planta, los sub-ensamblajes y las unidades de una planta de recuperación de biogás agrícola de etapa única para co-sustratos con higienización.

De acuerdo con Oechsner & Lemmer (2007), ya en el 2007 existían en Alemania 3500 plantas de biogás con capacidad para generar más de 1 GW de electricidad. Lo cual muestra claramente la política del gobierno Alemán en esta esfera, la cual le reporta además de electricidad, calor y fertilizante orgánico.

Estas plantas pueden operar en régimen mesofílico (37-42 °C) o termofílico (46-55 °C), en mono fermentación y co-fermentación, siendo estas últimas las más utilizadas. Según (Oechsner & Lemmer (2007), la co-fermentación tiene las siguientes ventajas: optimiza la relación C/N, incrementa el rendimiento de biogás, influye en la cantidad y calidad del biogás, estabiliza el proceso, agrega valor al tratamiento de los residuos, cierra el ciclo de los nutrientes. Como desventajas, estos autores plantean: riesgo de introducir al sistema sustancias tóxicas (residuos industriales y municipales), organismos patógenos. Por tal motivo, cuando se utilizan este tipo de sustratos es necesaria una descontaminación de los mismos.

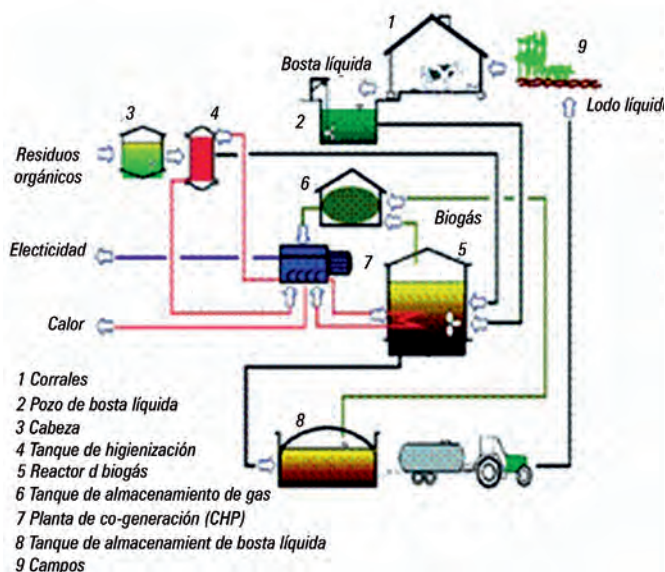


FIGURE 4. Outline of a plant of agricultural biogas recovery for co-substrate. Sources: (Institute Leibniz for the Agricultural Engineering Potsdam-Bornim, ATB).
 FIGURA 4. Esquema de una planta de recuperación de biogás agrícola para co-sustratos. Fuente: (Instituto Leibniz para la Ingeniería Agrícola Potsdam-Bornim, ATB).

For such a reason, when this type of substrate is used, it is necessary to decontaminate it. In the continuous development, investigation and introduction of improvements in these plants in Germany, different productive and academic institutions have worked and some of the merits and flaws reported have been published in the work of Schlegel *et al.* (2009). These authors outline that the sensibility of a biogas plant able to generate up to 500 kW-h/day of electricity is provided by achieving an appropriate relationship among factors like hours of daily operation, biogas operating cost (cultivate of energy plants, preparation of the substrate and their transport), cost of the initial investment, efficiency of the plant and utility for the sale of the electric power). Likewise Schlegel *et al.* (2009), mention that the most common problems are presented in the groups: motor-generator, apparatuses for substrate removing, pipes for heating the substrate, mensuration and control apparatuses, plastic cover to retain, store and evacuate the biogas produced. These authors analyze annual and daily hours of total load and the relative load in the years 2004 and 2005, obtaining the values presented in Table 1.

En el continuo desarrollo, investigación e introducción de mejoras de estas plantas en Alemania han trabajado diferentes instituciones productivas y académicas, algunos de los méritos y fallas reportadas se reportan en el trabajo de Schlegel *et al.* (2009). Estos autores plantean que: la sensibilidad de una planta de biogás capaz de generar hasta 500 kW-h/día de electricidad está dada en lograr una adecuada relación entre los siguientes factores: horas de funcionamiento diario, costo de la producción de biogás (cultivo de plantas energéticas, preparación de los sustratos y su transporte), costo de la inversión inicial, eficiencia de la planta y utilidad por la venta de la energía eléctrica). Así mismo Schlegel *et al.* (2009), mencionan que los problemas más comunes se presentan en los conjuntos: motor-generator, aparatos removedores del sustrato, tuberías para la calefacción de los sustratos, aparatos de medición y control, cubierta plástica para retener, almacenar y evacuar el biogás producido. Estos autores analizan las horas de carga total por año, por día y la carga relativa en los años 2004 y 2005, obteniendo los valores que se presentan en la Tabla 1.

TABLE 1. Total load hours per year, per day and relative load. Source: Schlegel *et al.* (2009)
 TABLA 1. Horas de carga total por año, por día y carga relativa. Fuente: Schlegel *et al.* (2009)

Year	Annual electricity production kWh _a /a	Daily electricity production kWh _d /d	Total load hours per year h/a	Total load hours per day h/d	Relative loads %
2004	2 537 593	6 952	5 106	14,0	58,29
2005	3 001 995	8 225	6 040	16,5	68,95

From the analysis of Table 1, it is inferred that the quantity of working hours daily determines the electricity production and the relative load of these facilities. According to Schlegel *et al.* (2009), in these plants the remove apparatus has the following functions: to avoid floating and deposited layers, to mix fermented and fresh substrates, to homogenize the

Del análisis de la Tabla 1, se infiere que la cantidad de horas de trabajo diario determinan la producción de electricidad y la carga relativa de estas instalaciones. De acuerdo con Schlegel *et al.* (2009), en estas plantas el aparato removedor tiene las siguientes funciones: evitar capas flotantes y sedimentadas, mezclar los sustratos frescos y los fermentados, homogenizar la

substrate temperature and to make biogas flow. These authors mention that optimizing the process requires to avoid breakdowns of the motor (risk for lack of heat supply), to avoid the supply of great quantity of cold substrate (risk of reduction of temperature), to avoid failures in the remove apparatus (appearance of bubbles, risk of obstruction of the pipes) and to provide external energy to the beginning of the process. In these plants, a constant monitoring of the quantity of biogas produced and its contents of methane, dioxide of carbon and sulfur is carried out. It is also foreseen the cleaning or H₂S elimination from the biogas to prevent that this element causes damages and interference in the process of electricity generation, since the motor that activate the generator works with a part of the biogas obtained in the plant.

A biogas plant of great format involves a group of facilities that involve a closed technological flow, in which the feeding with animal and agricultural substrates is interconnected with the animals' facilities and silos type bunker where the agricultural substrate is fermented. This group of facilities should have a very connected infrastructure with the necessary and specific agricultural machinery for the storage and processing of the substrate, electricity and heat productions, as well as those for gathering and application of the obtained bio fertilizer (digested) into the areas of agricultural production. In Figure 5, an outline of the process is shown in this type of plants (Lemmer, 2009). The technical data of this installation are: Use of fermentable substrate: liquid excretes: 7,200 kg/day; solid excretes: 3,500 kg/day. Use of agricultural co-substrate: field fruits-GPS: 3,000 kg/day; grass silage: 1,500 kg/day; grains: 1,000 kg/day. Specifications of the installation: Volume of the fermenter: 2 x 923 m³. Volume of the procedural digestate tank: 1 x 923 m³. Electric power generated in the biogas plant: 186 kilowatts-h. Thermal power generated: 207 kilowatts-h. The cost of this type installation oscillates among the 2 to 2, 5 million Euros.

temperatura de los sustratos y hacer fluir el biogás. Estos autores mencionan las siguientes posibilidades de optimizar el proceso: evitar averías del motor (riesgo por falta de suministro de calor), evitar el suministro de gran cantidad de sustratos fríos (riesgo de reducción de la temperatura), evitar averías en el aparato removedor (aparición de burbujas, riesgo de obstrucción de las tuberías) y suministrar energía externa al inicio del proceso.

En estas plantas se realiza un monitoreo constante de la cantidad de biogás producido, su contenido de metano, su contenido de dióxido de carbono, el contenido de azufre y está previsto la limpieza o desulfuración del biogás para impedir que este elemento ocasione daños y perturbación en el proceso de generación de electricidad, ya que el motor que acciona el generador trabaja con una parte del biogás obtenido en la planta.

Una planta de biogas de gran formato involucra un conjunto de instalaciones que dan lugar a un flujo tecnológico cerrado, en el cual la alimentación de los sustratos de origen animal y agrícola está interconectada con las instalaciones de los animales y silos tipo trinchera (bunker) donde se fermentan los sustratos agrícolas. Este conjunto de instalaciones debe poseer una infraestructura bien conectada con la maquinaria agrícola necesaria y específica para el acopio y procesamiento de los sustratos, producción de electricidad, calor; así como la destinada a la recolección y aplicación en las áreas de producción agrícola del biofertilizante obtenido (digestato). En la Figura 5, se muestra un esquema del proceso en este tipo de plantas (Lemmer, 2009). Los datos técnicos de esta instalación son: Uso de **sustratos fermentables**: excreta líquida: 7,200 kg/día; excreta sólida: 3,500 kg/día. Uso de **co-sustratos agrícolas**: frutas de campo-GPS: 3,000 kg/día; Silage de hiervas: 1,500 kg/día; granos: 1,000 kg/día. Especificaciones de la instalación: Volumen de los fermentadores: 2 x 923 m³. Volumen del tanque de digestato procesado: 1 x 923 m³. Potencia eléctrica generada en la planta de biogás: 186 kilowatts-h. Potencia térmica generada: 207 kilowatts-h. El costo de este tipo de instalación oscila entre los 2 a 2,5 millones de Euros.



FIGURE 5. Scale model of the biogas plant: "Unterer Lindenhof". Source: (Biogasanlage "Unterer Lindenhof" Poster. Hohenheim University. Stuttgart, 2009). Maqueta de la planta de biogás "Unterer Lindenhof". Fuente: (Biogasanlage "Unterer Lindenhof" Poster. Hohenheim University. Stuttgart, 2009).

On the other hand, the investigations to productive scale and in centers of investigations allow maintaining these facilities in constant change and development. All that helps to optimize these plants in the productive and economic aspects. In recent works, Oechsner *et al.* (2020) show some results obtained while comparing the results obtained to laboratory scale with regard to real scale, which confirms that an appropriate transferability exists from the obtained results to laboratory scale to real scale, the above-mentioned allows an improvement and optimization of the biogas plants continually.

Treatments of the Digested: The number and the size of the biogas plants in Germany are rising in an abrupt way according (Guides on the biogas. From the production until the use, 2013) (Guía sobre el biogás, 2013). The plants of multiple stages exhibit a lower residual gas potential at 20 - 22 °C and to 37 °C. This is mainly due to the fact that a plant of multiple stages has a higher time of retention that has the effect of reducing the residual gas potential. Since the high potential of hothouse of CH₄ (1 g CH₄ is equivalent to 23 g CO₂), it is desirable to reduce or to avoid the emissions of CH₄ of the digested storage tanks. The plants without final storage, safe against gas leakages, besides the operation in multiple stages (cascade digesters), satisfy, at least, one of the following requirements:

- Average of hydraulic retention time of the total substrate volume of at least 100 days to a continuous temperature along the year at least of 30 °C or rate of organic load of the digester <2.5 kg VS/m³ d.
- The calculation of the volume of the substrate should take into account all the inputs in the tank (s) of digestion (including, for example, water and/or recycled). If the aforementioned requirements are not fulfilled, it should be expected that the methane emissions exceed the values average. In these cases, it is advisable to recondition the tank (s) of digested storage with a safe closure against leaks of gas for at least the first 60 days of required storage of digested. The tank (s) of digested storage should fulfill the following requirements: a) it should not have active control of the temperature and b) the tank should be connected to the system for gas transporting. An effective prevention of emissions of CH₄ of the digested is achieved covering for the first 60 days of storage of required digested because, as it is known for experience, the methane formation under the prevalent conditions in a plant of the real world will have culminated in that period.

Particularities of the German Case

In accordance with the Law of Renewable Sources of Energy (EEG) of 2009, the covering of tanks of digested storage is a pre-requirement to receive the NawaRo voucher (energy cultivations), in the cases in which the plant can be authorized, according with the Law of Contamination Control of Germany. This includes all the plants whose capacity of total combustion exceeds 1 MW (equivalent to approximately 380 kWel) or whose capacity of dung storage exceeds 2,500 m³. Although this is applied to all the new

Por otra parte, las investigaciones a escala productiva y en centros de investigaciones permiten mantener estas instalaciones en constante cambio y desarrollo. Todo lo cual ayuda a optimizar estas plantas en los aspectos productivos y económicos. En trabajos recientes de Oechsner *et al.* (2020), estos autores muestran algunos resultados obtenidos en la comparación de resultados obtenidos a escala de laboratorio con respecto a escala real, lo cual confirma que existe una adecuada transferibilidad de los resultados obtenidos a escala de laboratorio con respecto a los obtenidos a escala real, lo anterior permite una mejora y optimización de las plantas de biogás continuamente.

Tratamientos de los digestatos: El número y el tamaño de las plantas de biogás en Alemania están elevándose de manera abrupta según la Guía sobre el biogás. Desde la producción hasta el uso, 2013 (Guía sobre el biogás, 2013). Las plantas de etapas múltiples tienden a exhibir un potencial de gas residual más bajo a 20 - 22 °C y a 37 °C. Esto se debe sobre todo al hecho de que una planta de etapas múltiples tiene un tiempo de retención más alto que tiene el efecto de reducir el potencial de gas residual. Debido al alto potencial de invernadero de CH₄ (1 g CH₄ es equivalente a 23 g CO₂), es deseable reducir o evitar las emisiones de CH₄ de los tanques de almacenamiento de digestato. Las plantas sin almacenamiento final a prueba de fugas de gas, además de la operación en etapas múltiples (cascada de digestores), satisfacen al menos uno de los siguientes requisitos:

- tiempo promedio de retención hidráulica del volumen del sustrato total de al menos 100 días a una temperatura continua a lo largo del año al menos de 30 °C o tasa de carga orgánica del digestor < 2.5 kg VS/m³·d.
- El cálculo del volumen del sustrato debe tomar en cuenta todos los insumos en el (los) tanque (s) de digestión (incluyendo, por ejemplo, agua y/o recirculado). Si no se cumple con los requisitos mencionados anteriormente, se debe esperar que las emisiones de metano excedan los valores promedio. En dichos casos, es aconsejable reacondicionar el (los) tanque (s) de almacenamiento de digestato con un sello a prueba de fugas de gas por al menos los primeros 60 días de almacenamiento requerido de digestato. El (los) tanque (s) de almacenamiento de digestato deben cumplir con los siguientes requisitos: a) no debe haber control activo de la temperatura y b) el tanque debe estar conectado al sistema de transporte de gas. Se logra una prevención efectiva de emisiones de CH₄ del digestato cubriendo por los primeros 60 días de almacenamiento de digestato requerido porque, como se sabe por experiencia, la formación de metano en las condiciones prevalecientes en una planta del mundo real habrá culminado dentro de ese periodo.

Particularidades del caso alemán

De acuerdo con la Ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG) de 2009, la cobertura de tanques de almacenamiento de digestato es un pre-requisito para recibir el bono NawaRo (cultivos energéticos) en los casos en los que se puede autorizar la planta de acuerdo con la Ley de Control de la Contaminación de Alemania. Esto incluye a todas las plantas cuya capacidad de combustión total excede 1 MW (equivalente a aproximadamente 380 kWel) o cuya capacidad de almacenamiento de

plants, the interpretation of the Law continues being in discussion regarding the existent plants, since in many cases, the rebuilding of digested storage tank is not possible or it is possible solely to a certain extent.

Use of Biogas Plants in Germany

As it is shown in the work, this is a mature technology and it is ready to start. There are several German companies that are in charge of their installation, setting up, technical support and guarantee services during their exploitation (after-sales).

Analysis of the Cuban Case. In Cuba several scientific institutions and Universities have studied the technology of biogas production during years. It was introduced for the first time in 1985, however, a peak in their study and implementation has been recently reached due to the proliferation of contracts with private pig producers, which are demanded for an appropriate treatment of the residual generated. Some investigations referred to the use of biogas (biodigesters) have been carried out. Guardado (2016), created the national Movement of Biogas Users in Cuba (MUB), which includes state and private producers that possess biodigester of medium and small format. That author refers that, in Cuba, it is possible to generate 27 MW of electricity from biogas. The constructive types of these biodigesters are: fixed dome, mobile dome and plastics or flexible. Fifteen provinces participate and around 3000 members belong to the Movement of Biogas Users (MUB). Guardado (2016) details the advantages and disadvantages of the biogas technology as follows:

Damages: contamination of the water bodies, transmission of illnesses, deterioration of the sanitary-hygienic conditions, emissions of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) to the atmosphere.

Benefits: cooking, illumination, heating, welding, incubation of eggs, transportation, motors of internal combustion, refrigeration, conservation of grains, fish culture, watering, fertilization to foliate, plagues control, soil improver, organic fertilizer, animal feed, worm culture and cultivation of mushrooms.

Economic-Environmental Feasibility of the Use of Biogas Plants of Great Format

ANALYSIS. In Cuba, until the present, the co-digestion of excrete of animal origin and biomasses of agricultural origin is not used. The existent biodigesters are single-stage types, of small and medium format, using mono-fermentation (pig or bovine excrete with water);

Cuban biodigesters are generally constituted for: ramp to feed the biomass (caw or pig excrete and water), load well, stabilization channel, gas meter, key in passing and valve for the exit of the biogas, biodigester and well of discharge of the effluents. The existent constructive types in Cuba (fixed dome, mobile dome and plastics or flexible) possess a cost of around 1500 at 2000 \$(CUP)/m³ of the biodigesters volume. The most widespread Cuban biodigesters oscillates among 10-12 m³, although other less utilized superior volumes exist.

bosta excede 2,500 m³. Aunque esto se aplica a todas las nuevas plantas, la interpretación de la Ley sigue estando en discusión respecto de las plantas existentes ya que, en muchos casos, el reacondicionamiento de tanque de almacenamiento de digestato no es posible o bien es posible solamente hasta cierto punto.

Utilización de plantas de biogás en Alemania

Como se muestra en el trabajo, esto es una tecnología madura y lista para poner en marcha. Existiendo varias empresas alemanas que se dedican a su instalación, puesta en marcha, asistencia técnica y servicios de garantía (postventa) durante su explotación.

Análisis del caso cubano. En Cuba varias instituciones científicas y Universidades a través del territorio nacional se han dedicado durante años al estudio de la tecnología del biogás. La misma fue introducida por primera vez en fecha tan temprana como 1985, sin embargo, en los últimos años se ha presentado un auge de la misma, motivado por la proliferación de convenios porcinos con productores privados, a los cuales se les exige un adecuado tratamiento de los residuales generados. En este aspecto se han conducido algunas investigaciones referido al uso de biogás (biodigestores), dentro de las cuales, se destaca las conducidas por Guardado (2016), este autor ha creado un movimiento nacional de usuarias del Biogás en Cuba (MUB), la cual agrupa a productores estatales y privados que poseen biodigestores de mediano y pequeño formato. Guardado (2016), plantea que es posible generar a partir de biogás 27 MW de electricidad en Cuba. Las tipologías constructivas de estos biodigestores son: de cúpula fija; de cúpula móvil y plásticos o flexibles. 15 provincias del país participan y alrededor de 3000 miembros pertenecen al movimiento de usuarios del biogás (MUB). Guardado (2016), detalla los perjuicios y bondades de la tecnología de biogás dentro de las cuales señala: **Perjuicios:** contaminación de los cuerpos de agua, transmisión de enfermedades, deterioro de las condiciones higiénico- sanitarias, emisiones de carbono (CO₂) y metano (CH₄) a la atmosfera. **Bondades:** cocción de alimentos, iluminación, calentamiento, soldadura, incubación de huevos, transportación, motores de combustión interna, refrigeración, conservación de granos, piscicultura, riego, fertilización foliar, control de plagas, mejorador de suelo, abono orgánico, alimento animal, lombricultura y cultivo de hongos.

Factibilidad económico-ambiental del uso de plantas de biogás de gran formato

ANALISIS. En Cuba hasta el presente no se utiliza la co-digestión de excretas de origen animal y biomasa de origen agrícola, los biodigestores existentes son de una sola etapa, de pequeño y mediano formato, utilizando la mono-fermentación (excretas porcinas o vacunas más agua). Los biodigestores cubanos de forma general están constituidos por: rampa para alimentar la biomasa (excretas más agua), pozo de carga, canal de estabilización, gasómetro, llave de paso y válvula para la salida del biogás, biodigester (fermentador) y pozo de descarga de los efluentes. Las tipologías constructivas existentes en Cuba (cúpula fija, cúpula móvil y plásticos o flexibles) poseen un costo de alrededor de 1500 a 2000 \$(CUP)/m³ del volumen del biodigester. Los biodigestores cubanos más generalizados

The biodigesters installed in Cuba cannot be considered like biogas plants, for not possessing the whole necessary infrastructure for such a definition. However, in Cuba until the present, only a minimum quantity of systematic studies referred to biodigesters of great format are reported, of them, the most significant are located in Havana (100 Street drain), biodigester that uses the urban solid residuals poured in that place, to produce methane and to give energy to a motor that works an electric generator facilitating the production and electricity distribution to the electric net of the territory. The Agro Industrial Company Guayos, in Sancti Spíritus, has settled a biodigester of 740 m³, it uses substrate from a pig multiplier center, four rabbit units, a slaughterhouse of pigs, cows and birds and a fish plant. The power of electric generation is of 1 MW-h. The produced biogas is compressed, it is stored in metallic cylinders and it feeds to internal combustion motors that put in action an electric generator. The effluents of the biodigestion process are spilled to a lagoon of oxidation (stabilization), from where they are taken to be used as fertilizer in grass areas utilized for feeding bovine livestock. In Martí Municipality, Matanzas Province, a biogas plant has been built with the technology of covered lagoon whose technical characteristics are: capacity of processing 3854 m³/day, volume of operation of the biodigester 1542 m³, total volume of the biodigester 1850 m³, biogas production per day 771 m³, volume of the secondary lagoon 617, 92 m³, reduction of emissions 5, 39 teq/day CO₂, reduction of DBO₅, and DOO > 95%, daily generation of electricity 1,542 MW-h. In Cuba, until the present, there is a little use of this type of biodigesters, hence it is necessary to think about the possibility of introducing and using in Cuba, biogas plants of great format like those built in Germany. The answer to this query is given in the use of this technology under a deep technical and economic analysis that ponders the advantages and disadvantages of its introduction in the country, which could represent an important opportunity to obtain several productive results like the production of electric power and heat and the use of the effluents of these plants like bio fertilizers and soil improvers; as well as to diminish the environmental contamination that cause when they are poured indiscriminately to the environment. The development of each one of these technologies is based on protocols and norms, which are of strict fulfilment according with the foreign investment laws and the sanitary requirements established in Cuba by the Ministry of Science Technology and Environment (CITMA). However, it is necessary to have the essential training, financing and equipment to decide about its possible technical-economic feasibility. In spite of some of these premises already exist, the authors of this review consider, the current economic conditions in Cuba do not allow this type of investment. Nevertheless, studies and constant learning should continue in order to evaluate and execute some variant of those installations as soon as the necessary financial capacity is available.

oscilan entre 10-12 m³, aunque existen otros volúmenes superiores menos utilizados.

Los biodigestores instalados en Cuba no se pueden considerar como plantas de biogás, por no poseer toda la infraestructura necesaria para tal definición. Sin embargo, en Cuba hasta el presente solo se reportan una cantidad mínima de estudios sistemáticos referidos a biodigestores de gran formato. De los cuales los más significativos están ubicados en la Habana (vertedero de calle 100), biodigester que utiliza los residuos sólido urbanos vertidos en ese lugar, para producir metano y dar energía a un motor que acciona un generador eléctrico posibilitando la producción y distribución de electricidad a la red eléctrica del territorio; en la empresa Agroindustrial de Guayos, Sancti Spíritus, se ha instalado un biodigester de volumen igual a 740 m³, utiliza sustratos de un centro multiplicador porcino, cuatro unidades cunícolas, un matadero de cerdos, reses y aves y una planta procesadora de pescado. La potencia de generación eléctrica es de 1 MW-h. El biogás producido se comprime, se almacena en cilindros metálicos y se alimenta a motores de combustión interna que accionan generadores eléctricos de un grupo electrógeno. Los efluentes del proceso de biodigestión se vierten a una laguna de oxidación (estabilización), de la cual son tomados para ser utilizado como fertirriego en áreas de pasto utilizadas para la ceba estabulada de ganado vacuno. En Matanzas (municipio de Martí), se ha construido una planta de biogás con la tecnología laguna tapada, cuyas características técnicas son: capacidad de procesamiento 3854 m³/día, volumen de operación del biodigester 1542 m³, volumen total del biodigester 1850 m³, producción de biogás por día 771 m³, volumen de la laguna secundaria 617,92 m³, reducción de emisiones 5,39 teq/día CO₂, reducción de DBO₅ y DOO > 95%, generación diaria de electricidad 1,542 MW-h. En Cuba hasta el presente se aprecia una poca utilización de este tipo de biodigestores, por lo que se pudiera pensar: ¿Es posible introducir y utilizar las plantas de biogás de gran formato utilizadas en Alemania en Cuba? La respuesta a esta interrogante pudiera estar dada en la utilización de esta tecnología bajo un profundo análisis técnico y económico que pondere las ventajas y desventajas de su introducción en nuestro país, lo cual pudiera representar una importante oportunidad para obtener varias salidas productivas que involucran: la producción de energía eléctrica, calor y utilización de los efluentes de estas plantas como biofertilizantes y mejoradores de suelo; así como disminuir la contaminación ambiental que estos provocan al verterlos indiscriminadamente al medio ambiente. El desarrollo de cada una de estas tecnologías se basa en protocolos y normas, las cuales son de estricto cumplimiento de acuerdo con las leyes de inversión extranjera y los requisitos sanitarios que establecen en nuestro país, el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA); sin embargo, se hace necesario constar con la capacitación, financiamiento y el equipamiento necesario para poder decidir su posible factibilidad técnico-económica. En el caso cubano, esto pudiera ser factible ya que se cuenta con algunas de estas premisas, pero a criterio de este autor, las condiciones económicas actuales no estas dadas aun para este tipo de inversión, lo anterior no limita su estudio y constante aprendizaje para cuando el país disponga de la capacidad financiera necesaria, ejecutar y evaluar alguna variante de este tipo de instalación.

CONCLUSIONS

In accordance with that reported in the precedent investigations, it can be concluded that:

- In the Cuban case, the biodigesters installed in the cow and pig farms to state and private scale, use generally the treatment type **mono fermentation** and it is of small and medium format. The residual of the production of biogas (digested), have little treatment and it is used very little as organic fertilizer and soil improver.
- The work shows that to introduce in the country a biogas plant of great format of German type, diverse factors should be pondered and in the authors' opinion, the country is not still in conditions of assuming such a challenge. Nevertheless, it is possible and pertinent to have the knowledge for, in a non-distant future, carrying out some variant of this installation type and to evaluate it under the real conditions of Cuba.

GRATEFULNESS

To the institutional project with code: (10667): "Effluents study (digestate) of biogas plant for their use as bio fertilizers".

REFERENCES

- FRANCESENA, L.Y.: Impacto ambiental provocado por efluentes de instalaciones de biogás de pequeña y mediana escala en las provincias de la región central de Cuba, Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas, Trabajo de diploma (en opción al título de Ingeniero Agrícola), Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 50 p., 2016.
- GUARDADO, J.A.: "Las FRE y el movimiento de Usuarios de Biogás en Cuba (MUB). Experiencias y Lecciones aprendidas", En: Taller de Biodigestión. Universidad «José Martí Pérez» de Sancti Spiritus. UNISS, Ed. UNISS, Sancti Spiritus, Cuba, p. 37, 20 de noviembre de 2016.
- GUÍA SOBRE EL BIOGÁS: Tecnología de la planta para la recuperación del biogás, [en línea], Guía sobre el biogás, 2013, Disponible en: www.fnr.de, [Consulta: 20 de septiembre de 2013].
- JÄKEL, K.: Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -Verwertung, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 1998.
- LEMMER, A.: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Hohenheim University, Poster, Stuttgart, Germany, 2009.
- MARTÍNEZ, H.C.; FRANCESENA, L.: "Tratamiento y utilización de efluentes instalaciones de biogás como abonos orgánicos, revisión y análisis", Centro Agrícola, 45(2): 83-92, 2018, ISSN: 0253-5785.
- MARTÍNEZ, H.C.; FRANCESENA, L.Y.; GARCÍA, L.Y.; MARTÍNEZ, F.N.R.: "Environmental Impact Caused by Effluents of Biogas Plants of Small and Medium Scale", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 26(4): 95-108, 2017, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- MARTINEZ, H.C.; OECHSNER, H.; GARCIA, L.Y.; LÓPEZ, G.L.: "Study of Enzymes Pre-Treatments in Biomasses Dedicated to Biogas Production", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 26(2): 55-64, 2017, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- NC-27: 2012: Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones, Inst. Oficina Nacional de Normalización, Norma Cubana NC, La Habana, Cuba, 11 p., Vig. de 2012.
- OECHSNER, H.; HUELSEMANN, B.; MARTÍNEZ, H.C.: "Transferability of Results from Laboratory Scale to Biogas Plants at Real Scale", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 29(2): 93-103, 2020, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- OECHSNER, H.; LEMMER, A.: State of the Art of Biogas Production in Germany, Hohenheim University, Presentación PowerPoint, Stuttgart, Germany, 2007.
- SCHLEGEL, M.; KANSWOHL, N.; POLANCO, G.; MARTÍNEZ, H.C.; PÉREZ, E.: Parámetros técnicos de importancia para una efectiva producción de biogás, Universidad de Granma, PowerPoint, Bayamo, Granma, Cuba, 2009.
- SCHULZ, H.; EDER, B.: Biogas in practice. Fundamentals, planning, plant construction, examples; Biogas-Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2006.
- SUÁREZ, H.J.; SOSA, C.R.; MARTÍNEZ, L.Y.; CURBELO, A.A.; FIGUEREDO, R.T.; CEPERO, C.L.: "Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba", Pastos y Forrajes, 41(2): 85-92, 2018, ISSN: 2078-8452.
- WEILAND, P.; RIEGER, C.: Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich; (FNR-FKZ: 00NR179); 1.-3, no. FNR-FKZ: 00NR179, Inst. Institut für Technologie und Systemtechnik/Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), tercer informe transitorio, Braunschweig, Germany, 2001.

CONCLUSIONES

De acuerdo con lo reportado en las investigaciones precedentes, se puede concluir que:

- En el caso cubano, los biodigestores instalados en las granjas vacunas y porcinas a escala estatal y privada, utilizan de forma generalizada el método de tratamiento denominado: **mono fermentación y son de pequeño y mediano formato**. Los residuales de la producción de biogas (digestatos), tienen poco tratamiento y se utilizan muy poco como abono orgánico y mejorador de suelo.
- El trabajo muestra que para introducir en el país una planta de biogás de **gran formato de tipología alemana**, diversos factores deben ser ponderados y a juicio del autor, el país no está **aún** en condiciones de asumir semejante reto. No obstante es posible y pertinente disponer del conocimiento para en un futuro no lejano llevar a cabo alguna variante de este tipo de instalación y evaluarla en las condiciones reales de Cuba.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto Institucional con código: (10667): "Estudio de efluentes (digestatos) de biodigestores de biogás para su uso como biofertilizantes".

Carlos M. Martínez-Hernández, Prof. Titular. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Carretera a Camajuani km 5.5. CP: 54830. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. Tel: 53-42-281692. Fax: 53-42-281608, e-mail: carlosmh@uclv.edu.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1853-1195>

Yaser García-López, Inv., Lab. LABIOFAM. Santa Clara. Villa Clara. Cuba, e-mail: yaserg1@uclv.edu.cu

Hans Oechsner, Prof. Titular, University of Hohenheim, State Institute of Agricultural Engineering and Bioenergy, Germany, e-mail: hans.oechsner@uni-hohenheim.de ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6718-1358>

The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

This article is subject to the Creative Commons 4.0 International Attribution-Non-Commercial License (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.

