

# Determinación de la Potencialidad de Biogás derivado de la excreta porcina en la granja El Algarrobo en Santiago de Cuba

AUTOR(S): Roisdel5r Hernández Castro

TUTOR(ES):

Dr. C.Prof. Tit. Eduardo Terrero Matos

Ing., Alina Beatriz Álvarez Bombus





# Determinación de la Potencialidad de Biogás derivado de la excreta porcina en la granja El Algarrobo en Santiago de Cuba

AUTOR(S): Roisdel Hernández Castro

TUTOR(ES):

Moa-2023

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a Dios y a todos aquellos que de una forma u otra tributaron a la realización de este proyecto de tesis, en especial a mi tutor Ms. C. Eduardo Terrero Matos por su asesoría, enseñanza y conocimientos que contribuyeron en mi formación académica. A todos los profesores del Instituto, que con tanta dedicación aportaron parte de su tiempo a impartir las asignaturas necesarias, y orientarnos para que pudiéramos obtener el éxito a lo largo de la carrera.

A el compañero Alexei Pérez Santiago dueño del porcino donde se realizaron las investigaciones pertinentes a dicho proyecto además facilitar los recursos e instalaciones de su granja.

A todos,

Muchas gracias

## **DEDICATORIA**

A la Revolución cubana que nos ha dado la posibilidad de formarnos y superarnos como profesionales.

A mis padres Gustavo Hernández Reina y Carmen Luisa Castro García y demás familiares.

A la Lic. Digna Suárez Fernández quien me facilitó materiales bibliográficos claves y complementarios para el desarrollo de las investigaciones medulares llevadas a cabo.

A mis compañeros de estudio que con pleno apego a la unidad tributaron a la consolidación de los conocimientos adquiridos y a todas aquellas personas que de una forma u otra me alentaron y apoyaron a que alcanzara mi objetivo.

## **PENSAMIENTO**

**El biogás no es un símbolo de pobreza, sino un combustible alternativo que nos brinda la naturaleza, la tecnología del biogás se afianza como alternativa competitiva y sostenible en la energización rural.**

**José Antonio Guardado Chacón**

## **RESUMEN**

Los residuos pecuarios son materiales provenientes de la actividad ganadera y son responsables de problemas ambientales, económicos y sociales. Así mismo, se analiza como nuevas alternativas de gestión y valorización de estos residuos de biomasa pecuaria en la generación de biogás. El objetivo de este trabajo de investigación fue, determinar la potencialidad de biogás derivado de la excreta porcina en la granja El Algarrobo, así como la propuesta de un biodigestor que mediante la digestión anaerobia aprovechara la biomasa residual pecuaria, obteniendo como productos de este proceso biogás y bioabono para su posterior utilización.

**Palabras Claves:** biodigestor, digestión anaerobia, porcino, biogás y bioabono.

## **SUMMARY**

Livestock waste is materials from livestock activity and is responsible for environmental, economic and social problems. Likewise, it is analyzed as new alternatives for the management and valorization of these livestock biomass waste in the generation of biogas. The objective of this research work was to determine the potential of biogas derived from pig excreta on the El Algarrobo farm, as well as the proposal of a biodigester that, through anaerobic digestion, would take advantage of the residual livestock biomass, obtaining biogas as products of this process. and biofertilizer for later use.

**Keywords:** biodigester, anaerobic digestion, swine, biogas and biofertilizer.

## INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
Introducción.....	6
1.1. Gestión Energética.....	6
1.2. Energía renovable .....	11
1.3. Energía de la Biomasa .....	11
1.3.1. Desarrollo de la tecnología de biogás en Cuba.....	12
1.3.2. Fundamentos de la tecnología del biogás .....	13
1.3.2. 1. Degradación anaerobia en la materia orgánica.....	14
1.3.2. 2. Temperatura de la digestión. ....	15
1.3.2. 3. El PH .....	17
1.3.2. 4. Nutrientes .....	17
1.3.2. 5. Tiempo de retención .....	18
1.3.3. Tipos de sustratos empleados en la producción de biogás. ....	18
1.3.4. Acondicionamiento del sustrato previo a la producción de biogás .....	19
1.3.5. Gestión del aprovisionamiento de los subproductos. ....	20
1.3.6. Tipos de Biodigestores para la producción de biogás .....	20
1.3.7. Generalidades de las etapas fundamentales de la producción de biogás .....	24
1.3.8. Aspectos que se deben conocer al ubicar un biodigestor. ....	27
1.4. Descripción de la metodología para la producción de biogás .....	27
1.5 Métodos de separación solido- liquido.....	28
1.6. Conclusiones del capítulo I .....	30
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
2. Caracterización de la finca “El Algarrobo” .....	31



2.1. La contaminación generada por la granja porcina.....	31
2.2. Según algunos autores así se calcula la cantidad de excreta por peso de un cerdo .....	32
2.3. Diagnóstico de las potencialidades de energía renovable de La finca “El Algarrobo” en Santiago de Cuba.....	34
2.3.1. Determinación del potencial energético de la biomasa en La finca “El Algarrobo”... 35	
2.3.1.2. Estimación del potencial de substratos .....	36
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA-SOCIAL E IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>45</b>
Conclusiones del capítulo.....	50
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>Bibliografías .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>56</b>

## INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos se está incrementando cada día a nivel global y su deficiente aprovechamiento está provocando serios problemas ambientales, económicos y sociales. El incremento de la población en el mundo, la demanda de energía y la contaminación ambiental crecen de forma acelerada, sin embargo, la producción de energía no se incrementa de la misma manera. Las fuentes de que se dispone son múltiples, pero solo unas pocas son aprovechadas en el proceso de abastecimiento.

En consecuencia, una fracción mayoritaria de estos residuos sólidos corresponde a la biomasa residual, que se define como aquellos materiales orgánicos renovables, que se generan en diferentes actividades: urbanas, agrícolas, pecuarias, agroindustriales entre otros, esta biomasa residual pecuaria son materiales resultantes de la actividad ganadera, por otro lado, su elevada generación y su falta de tratamiento son responsables de la emisión de gases con mayor potencial de calentamiento global; entre estos gases se encuentran el metano ( $\text{CH}_4$ ) proveniente de la fermentación entérica de rumiantes, óxido nitroso procedente del estiércol, y el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que contribuye a la acidificación de la lluvia y los ecosistemas.

En Cuba la aplicación de las tecnologías destinadas al tratamiento de esta biomasa ha estado limitada en gran medida por el desconocimiento y la poca comercialización de las alternativas tecnológicas existentes. Durante muchos años, los residuales porcinos en Cuba se han tratado con el empleo de biodigestores anaerobios convencionales. La tecnología del biogás a escala rural ofrece múltiples beneficios a sus usuarios, entre ellos, un adecuado tratamiento de los residuos agropecuarios, ahorro de electricidad con el uso del biogás para la cocción de alimentos y el empleo del digestato que es uno de los productos finales del proceso de digestión anaerobia como fertilizante orgánico.

Los principales tipos de biodigestores que han sido difundidos en Cuba son: el “biodigestor de tapa fija o de tipo chino”, el “biodigestor de campana flotante o de tipo hindú”, el “biodigestor tubular o de bolsa de polietileno” y el “biodigestor híbrido cubano;

más del 80 % de la generación eléctrica se realiza a partir de combustibles fósiles (fuel oíl, crudo nacional y diésel), por lo que reviste especial importancia la participación de otras fuentes energéticas que contribuyan a su sustitución. La biodegradación de esta biomasa para la producción de biogás podría aportar beneficios no sólo energéticos, sino también ambientales contribuyendo al mejoramiento del entorno rural, urbano e industrial y a la recuperación de los suelos.

Un problema importante que enfrentan las granjas porcinas es el manejo de las excretas, debido a que se producen en gran cantidad y generan problemas de almacenamiento en los corrales y demás instalaciones donde se alojan los cerdos (Ninabanda, 2012). El problema de la disposición sanitaria de los desechos de las explotaciones porcinas es de gran magnitud. Es necesario tener en cuenta que aproximadamente dos tercios de los alimentos suministrados a los cerdos se convierten en desechos, de los cuales el 60% es concentrado que se puede aprovechar.

Seguir arrojándolas sin ningún control, implica no solo un deterioro del ambiente sino una pérdida de energía y nutrientes lo cual significa pérdida de una oportunidad económica (Granada, Artunduaga y Gordillo, 2009). Las excretas porcinas pueden generar recursos muy valiosos mediante su procesamiento al reciclarse parte de la energía y de sus nutrientes, contribuyen a convertir la producción porcina en sostenible. La biomasa tiene múltiples clasificaciones, pero la que nos interesa mencionar es la biomasa residual húmeda, que en ausencia de oxígeno es descompuesta por agentes bacteriológicos generándose un gas de alto poder calorífico denominado biogás y otros residuos aprovechables como abono.

**La situación problemática** de la investigación está dada en la Granja Porcina “El Algarrobo”, perteneciente a la UBPC Las Guácimas, situada en la provincia Santiago de Cuba en el kilómetro 10 Carretera de Siboney ½ el brujo Dicha granja se dedica a la cría y sacrificio de animales porcinos, para lo cual emplean la madera de la tala de los árboles que rodean el criadero, en función de garantizar las actividades de calentar el agua requerida en el sacrificio porcino, elaboración de alimento animal y para el personal de servicio entre otros. Lo anterior constituye:

1. Tala de árboles indiscriminada;

2. Inconformidad en la vecindad circundante por la contaminación visual que tales residuos generan;
3. Las condiciones de trabajo para los que laboran en el sacrificio animal es deplorable;
4. Existe advertencia del SIGMA por los efectos contaminante que trae consigo el verter estos residuos al suelo sin un control adecuado.
5. Volúmenes representativos de la excreta porcina que no están siendo aprovechable.

A partir de lo expuesto se declara como **problema:**

Necesidad de estimar el aprovechamiento eficiente de biogás y biofertilizante por unidad volumétrica de excreta porcina que se genera diariamente en la granja El Algarrobo de la UBPC Las Guácimas, kilómetro 10 Carretera de Siboney. Provincia Santiago de Cuba.

**Objeto de la investigación:** excreta animal (porcino) disponible en la granja El Algarrobo de la UBPC Las Guácimas, kilómetro 10 Carretera de Siboney. Provincia Santiago de Cuba para el uso adecuado del biogás y biofertilizante.

**Campo de acción:**

**Potencialidad de biogás y biofertilizante aprovechable derivado de la excreta animal (porcino) en la granja El Algarrobo de la UBPC Las Guácimas, kilómetro 10 Carretera de Siboney. Provincia Santiago de Cuba.**

**Objetivo general del trabajo:** determinar la Potencialidad de Biogás y biofertilizante derivado de la excreta porcina en la granja El Algarrobo de la UBPC Las Guácimas, kilómetro 10 Carretera de Siboney. Provincia Santiago de Cuba de manera que estos conocimientos contribuyan a la toma de decisiones para su aprovechamiento.

A partir de los trabajos consultados se define la siguiente:

**Hipótesis:** si se determina eficientemente la potencialidad de excreta porcina en la granja El Algarrobo en Santiago de Cuba, entonces es posible conocer los volúmenes

de biogás y biofertilizante diario aprovechable en dicha granja y proponer el biodigestor acorde a criterio técnico y económico.

Para darle cumplimiento al objetivo general se definen los siguientes **Objetivos específicos**:

1. Determinar la potencialidad de biogás resultante de excreta porcina en metros cubico/día ( $m^3/día$ ).
2. Proponer el diseño más eficiente de un biodigestor atendiendo a las necesidades existente en dicha instalación, a partir de las excretas porcinas para su debido uso.
3. Evaluar desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental el uso de la biomasa.

**Para lograr el cumplimiento del objetivo general de esta investigación, se plantean las siguientes tareas:**

1. Conformación del estado del arte y abordar los fundamentos teóricos-prácticos sobre la temática tratada a través del análisis bibliográfico.
2. Caracterización de los residuos biodegradables de origen animal (porcino) y de las condiciones existentes en La Granja Porcina “El Algarrobo”, para la selección de un biodigestor.
3. Estimación de la masa porcina del peso equivalente de cada cría
4. Determinación de la potencialidad de excreta porcina en kg por categoría/peso en la granja El Algarrobo de la UBPC las Guácimas, kilómetro 10 Carretera de Siboney. Provincia Santiago de Cuba.
5. Análisis de prototipo de biodigestores y la selección más acertada para la condición de la granja porcina que se investiga.
6. Calculo de dimensionamiento tecnológico del biodigestor.
7. Determinación de la cantidad de biofertilizante resultante en el recipiente de compensación.

### **Métodos de Investigación:**

- Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.
- Método inductivo-deductivo para el establecimiento de las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para la fermentación y biodigestión, al ser aplicadas al material biomásico envejecido.
- Métodos de investigación experimental para contribuir a la descripción y caracterización del objeto de estudio y sus principales regularidades.
- Métodos de compilación de conocimientos mediante entrevistas, encuestas, intercambios de conocimientos, consultas a expertos y revisión de bibliografía, para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Técnicas computacionales para el cálculo y representación gráfica de las variables que caracterizan los procesos experimentales y las magnitudes geométricas de las instalaciones.

# **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

## **Introducción**

En el presente capítulo se describe el Marco Teórico y el Marco Contextual relacionados ambos con el objeto y campo de acción de la investigación. De los análisis que se realizan quedan suficientemente argumentados el Problema Científico, el Objetivo General que se ha propuesto y la correcta dirección de trabajo que se establece en la Hipótesis de la Investigación y en los Objetivos Específicos.

### **1.1. Gestión Energética**

Cualquier programa de gestión energética debe incluir el análisis de las potencialidades del uso de las energías renovables disponibles, enmarcado en el sector agropecuario que es el más impactante en el medio ambiente después del sector industrial (Hotel Energy Solution, 2011). Estos criterios permiten definir como objetivo del presente capítulo: crear un entorno teórico que incluya los fundamentos dirigidos a la gestión energética y el uso de la biomasa, como parte de los trabajos precedentes desarrollados en el sector agropecuario.

Se realizaron importantes investigaciones enmarcadas en la gestión total de la eficiencia energética, incluyendo el estudio y aplicación de la biomasa como fuente alternativa de energía renovable.

En materia de eficiencia energética, algunos autores han propuesto las herramientas básicas y procedimientos para programas de control y mejoramiento de la eficiencia energética en empresas de producción y servicios (Campos et. Al, 1999; Borroto, 2006). Definido que lo más importante para lograr la eficiencia energética de una empresa es la implementación de un sistema de gestión energética, que garantice un plan de ahorro de energía que sea renovado cada vez que sea necesario. Este trabajo se centra en la importancia de un sistema de gestión energética y no en la realización de un diagnóstico energético a profundidad.

Relacionado con la Gestión Energética en el sector industrial y de los servicios (Lobaina, 2003), aplica las nuevas tecnologías para el uso eficiente de la energía. Estas aplicaciones se han diversificado por todo el país a partir de la participación de grupos

multidisciplinarios compuestos por profesionales universitarios y de las distintas empresas. Básicamente el alcance de estas investigaciones de gestión energética consiste en realizar, conjuntamente con el cliente, un análisis de la situación energética de la planta industrial, a manera de diagnóstico (cuánta energía se consume, dónde se consume, qué cantidad de ella se desperdicia, etc.), con el objetivo de identificar oportunidades evidentes de ahorro que produzcan beneficios económicos directos.

(Borroto, 2006) en su obra “Gestión energética en el Sector Productivo y los Servicios” presenta los principios fundamentales y los procedimientos para la evaluación, el diagnóstico, la organización, la ejecución y la supervisión de la gestión energética en las empresas, para lograr el objetivo de reducir sus costos energéticos y elevar su competitividad. Se presentan en particular los principios, herramientas y procedimientos para la implantación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía en empresas industriales y de servicios. Estos elementos teóricos adquieren relevancia cuando son aplicados a soluciones particulares.

Se estima que, en la industria cubana, las actividades con mayores potenciales son: el níquel, el cemento, el acero, la generación eléctrica, la refinación de petróleo y en menor medida las industrias alimenticias y el papel. En todas ellas las medidas en lo fundamental se dirigen a elevar la disciplina tecnológica, mejoras técnicas y técnico-organizativas, aprovechamiento del vapor residual, sustitución por combustibles económicamente más ventajosos, mejoras en la combustión, automatización de los controles y otras (Borroto et. Al, 2006).

Relacionado con el aprovechamiento de la energía de la biomasa en el mejoramiento de los resultados de la Gestión Total de la Eficiencia Energética (Mediaceja, 2011) muestra la propuesta de fabricación de un biodigestor, a partir de la caracterización del comportamiento del consumo de los portadores energéticos y el levantamiento de la generación de excrementos en una UEB de producción cooperativa.

(Comas, 2011) propone un indicador general de gestión energética para la Empresa de Cigarrillos “Juan D. Mata Reyes” que contribuya a elevar la eficiencia en el uso de los portadores energéticos en la Empresa de Cigarrillos “Juan D. Mata Reyes”. Se diseña un procedimiento que guía metodológicamente el cálculo del indicador y para su



realización se utilizan métodos y herramientas tales como: el uso parcial de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía, el coeficiente de Kendall, tormenta de ideas y cuadro de mando. Para el cálculo del indicador primero se diagnostica la situación actual de la gestión energética de la empresa y se calcula cada indicador específico por portador energético hasta llegar al indicador general de gestión energética en la organización. Además, se proponen mejoras para contribuir a elevar la eficiencia en el uso de los portadores energéticos en la empresa.

Cualquier programa de gestión energética debe incluir el análisis de las potencialidades del uso de las energías renovables disponibles, enmarcados en el sector agropecuario que es el más impactante en el medio ambiente después del sector industrial. Estos criterios permiten definir como objetivo del presente capítulo: crear un entorno teórico que incluya los fundamentos generales dirigidos a la gestión energética y el uso de la biomasa, como parte de los trabajos precedentes desarrollados en el sector agropecuario.

### **Energía de la biomasa**

Espinosa (1986, citado por Roche Salazar, 2014) propone proyecto de solución basada en el “arrastre hídrico” de la gallinaza a partir de revestir los fosos de las naves avícolas con espesores pequeños de hormigón pulido y sistemas exteriores de recolección para su conducción a digestores y posterior tratamiento por lagunas de la fracción líquida, pero la dirección del CAN ha rehusado establecer aunque sea de forma experimental este sistema alegando “que las gallinas se estresan con el agua de las mangueras”.

La Organización Panamericana para la Salud (1999) facilita un Manual para la Elaboración de Compost, donde se plasman los resultados de investigaciones de la relación carbono/nitrógeno en base seca de diversos residuos agroindustriales y sus mezclas. Martina et al (2003, citado por Villacrés Jirón, 2016) exponen los resultados de algunos de los ensayos de biodigestión anaeróbica para obtención de gas metano de aserrín de diferentes maderas obtenidas como residuo de carpinterías. Para ello se utilizaron los desechos de madera de la zona, mezclados, proporcionalmente con orina y heces fecales. Se indican los porcentajes y volúmenes de carga, la relación entre agua, aserrín y volumen libre, volúmenes de gases producidos, tiempos de reacción,

mediciones de pH y porcentajes de dióxido de carbono obtenidos, así como el tratamiento previo realizado al aserrín para deslignificarlo.

(Fernández, 2003) realiza un estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos, donde expone los resultados de la producción de metano con diferentes tiempos de retención hidráulica, utilizando mini biodigestores en los ensayos de varias mezclas de la biomasa tratada.

(Carrillo, 2004) expone que los biodigestores con alimentación batch se construyen cuando es difícil obtener la materia prima diariamente. A las dos semanas comienza la producción de biogás y continúa por unos tres meses. Cuando cesa se abre el digestor y se limpia, para cargarse de nuevo.

En la temática de aprovechamiento de la energía de la biomasa (Caraballo, 2006) realiza metodología GBV para la selección, diseño y construcción del biodigestor atípico del ISMM, donde utiliza tanques metálicos recuperados y agitador accionado por energía eólica (Savonius – Darreius).

En la temática de aprovechamiento de la energía de la biomasa (Barrera, 2006) hace una propuesta tecnológica para producir biogás con fines energéticos a partir del levantamiento de la generación de residuos biodegradables y su factibilidad, previa evaluación de la demanda en una entidad agropecuaria.

(Guardado, 2007) desarrolla un procedimiento para el diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, donde se correlacionan los datos estadísticos de los resultados de los levantamientos de los residuos biodegradables, las demandas de biogás, los parámetros de diseño de la instalación biodigestora, así como los requerimientos en recursos materiales y de mano de obra.

(Villanueva, 2008) desarrolla un proyecto de producción de biogás para uso en el hogar, a partir de los residuales de la alimentación y estiércol de la cunicultura con una preparación previa de la mezcla seleccionada y ponderada, donde se da tratamiento al secado solar y humectación al material antes de someterlo al proceso de codigestión anaerobia.

(Cobián, 2008) desarrolla Tratamiento aerobio-anaerobio de residuos ganaderos para

obtención de biogás y compost donde estudia y caracteriza la cobiodigestión de residuos, aplicando ensayos semi-pilotos de sistemas continuos de recirculación de deyecciones bobinas, avícolas y de cosechas, logrando satisfactorios resultados de rendimiento biogás de 99,2 litros/kg (63,5%  $CH_4$ ) y de biofertilizante de excelente calidad.

(Domínguez, 2009) del Instituto de Investigaciones Porcinas en Cuba, recomienda Biodigestores del tipo Nicarao de diversas capacidades como componentes de Sistemas agropecuarios integrados. Instituto de Investigaciones Porcinas, donde se facilita la selección de las dimensiones y la dosificación de los materiales constructivos.

(Regalado, 2009) realiza un estudio de la generación de biogás y fertilizante orgánico utilizando desechos orgánicos y lodos estabilizados, obteniendo rendimientos acumulados de biogás hasta 81 l/kg.

(Agencia Andaluza de Energía, 2011) expone los resultados investigativos de los componentes del biogás en función del sustrato utilizado, siendo el rendimiento de hasta 90,7 m<sup>3</sup> de Biogás/Tonelada de residuos y de ellos 54,4 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> / Tonelada de residuos con base gallinaza.

(Monterroso, 2011) expone los resultados del estudio de la cobiodigestión de los efluentes del procesamiento de la harina de papa, mezclando con otras biomásas de residuales agropecuarios (tallos, hojas frescas y secas de plátano, Cascarilla de arroz, rumen vacuno, vísceras de pescado y levadura fresca), donde se obtienen bajos rendimientos en biogás ( $\leq$  13,2 litros/kg), pero un alto potencial como biofertilizante.

(Terrero, 2012) realiza una variante de la tecnología de fabricación de un biodigestor de mampostería y concreto para una granja porcina a partir de la demanda de biogás con destino al matadero de cerdos y un levantamiento de la generación de excrementos en ese establecimiento de una empresa de servicios.

(Espinosa, 2013) en XI Congreso de Ing. Hidráulica expone resultados de fabricación de planta de tratamiento de residuales de centro porcino para producción de biogás en biodigestor de campana móvil, con capacidad de 20 m<sup>3</sup>/día y 2,65 m<sup>3</sup>/día de lodos digeridos.

(Field, 2013) Facilita procedimiento de medición estimada de la concentración de metano en el biogás, utilizando el principio de la “Botella de Mariotte”, cuando carecemos de otros instrumentos de laboratorio más precisos, tales como el Cromatógrafo.

Del análisis de los resultados de las investigaciones y trabajos precedentes antes expuestos se derivan las siguientes **conclusiones**:

- Insuficiente la gestión energética en la agricultura.
- Insuficiente el tratamiento a las alternativas energéticas de la energía renovable.
- En los estudios de evaluación de la biomasa no se particulariza los efectos del aprovechamiento energético y del impacto ambiental de las emisiones de la materia orgánica envejecida, especialmente de los excrementos animales que se acumulan como consecuencia del manejo establecido.

## **1.2. Energía renovable**

Las energías renovables son aquellas fuentes que de forma periódicas se ponen a disposición del hombre, y que este es capaz de aprovechar y transformar en energía útil para satisfacer sus necesidades. Se renueva de forma continua a diferencia de los combustibles fósiles como el Petróleo, Carbón, Gas y Uranio, de los cuales existen reservas que pueden agotarse en un plazo más o menos largo.

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del Sol.

## **1.3. Energía de la Biomasa**

El biogás está comprendido dentro de las fuentes de energía renovables, utilizando como materia prima para su producción diferentes materiales residuales, como: excretas de animales, residuos de la industria azucarera, residuos agrícolas, efluentes de la industria del papel, destilerías, residuales urbanos, etc. Es una mezcla de gases que contienen metano, anhídrido carbónico, hidrógeno, oxígeno, gases diversos y pequeñas porciones de anhídrido sulfuroso.

Durante el proceso de producción del biogás se genera también fertilizante orgánico de buena calidad y alto contenido de nitrógeno, el que supera el estiércol fresco, por lo tanto, para la construcción de las instalaciones de biogás debe estar fundamentado en una minuciosa caracterización de los aspectos fundamentales que inciden en la correcta selección, diseño y explotación de estas tecnologías.

### **1.3.1. Desarrollo de la tecnología de biogás en Cuba**

Según expertos del Grupo Nacional de Biogás, perteneciente al Grupo Central de Energía Renovable y Eficiencia Energética, la primera aplicación industrial del biogás en Cuba data de 1940. En aquel momento se construyeron dos biodigestores para procesar los residuales de la Cervecería del Cotorro.

El uso del biogás creció aceleradamente a partir de 1980 y se construyeron biodigestores de las tecnologías de campana flotante y de cúpula fija. El principal uso ha sido en la cocción de alimentos con el consecuente ahorro de combustibles, aunque se ha empleado puntualmente en alumbrado y generación de electricidad.

En los años 1990 surgió el Movimiento Nacional de Biogás y hasta el 2006 se construyeron más de 500 plantas. Hoy existen unas 700 plantas de biogás en granjas estatales y en el sector campesino. Se han identificado potencialidades para usar el biogás en la cogeneración de energía eléctrica y energía térmica a partir de residuales de la industria azucarera y del café, entre otros.

Según datos del Grupo Nacional de Biogás, el potencial en Cuba supera los cuatrocientos millones de metros cúbicos anuales. Si se aprovechara adecuadamente, se podría instalar una potencia de generación eléctrica de 85 MW y producir más de 700 GWh al año. Así se evitaría emitir más de tres millones de toneladas de dióxido de carbono y se ahorrarían unas 190 mil toneladas de petróleo. Además, se obtendrían unos dos millones de toneladas de abono orgánico al año y se reduciría la carga contaminante. Datos preliminares ubican a Ciudad de La Habana, La Habana y Pinar del Río, como los territorios con mayor potencial (Arrastía, 2009).

Resulta peculiar en Cuba que cuando los autores se refieran a las tecnologías para la producción de biogás se aborde solamente la etapa de digestión anaerobia (Barreto,

2006), quien propone en su tesis doctoral una metodología para la selección de alternativas óptimas y evaluación de plantas de biogás, cuyo aporte principal es la inserción industrial de estos procesos en el desarrollo regional pero cuando aborda la selección de tecnologías se dan criterios cualitativos para cada tipo de digestor como la carga orgánica que pueden asimilar, el por ciento de sólidos, los tiempos de retención de líquidos y sólidos, las eficiencias de remoción de materia orgánica, sin embargo solo se menciona muy brevemente las etapas de pretratamiento como una vía para solucionar las incompatibilidades del sustrato con la tecnología y no se exponen ejemplos sobre como varía el tipo de digestor con el tipo de sustrato empleado.

(Zamora, 2001) propone una metodología para el diseño de plantas de biogás, pero en ella no se especifica el tipo de planta, aunque si se exponen factores a tener en cuenta para un buen funcionamiento de una planta de biogás, también refiriéndose únicamente a la etapa de digestión. (Montalvo, 2003) aborda con profundidad varias etapas tecnológicas en el libro “Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás”, sin embargo, se obvian las etapas de pretratamiento y no se realizan propuestas concretas sobre cuál alternativa es más idóneas para el país.

### **1.3.2. Fundamentos de la tecnología del biogás**

La **digestión anaerobia** es un proceso biológico donde la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El proceso de digestión anaerobia es idóneo para la [reducción de emisiones](#) de [efecto invernadero](#), el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

Un biodigestor es un sistema natural y ecológico que aprovecha la digestión anaeróbica (en ausencia de oxígeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformar éste en biogás y fertilizante. El biogás puede ser empleado como combustible en las cocinas, iluminación, y en grandes instalaciones se puede utilizar

para generar energía eléctrica. El fertilizante, que se obtiene, se considera de la misma importancia, que el biogás ya que provee a las familias campesinas de un abono natural que mejora mucho el rendimiento de las cosechas.

### **1.3.2. 1. Degradación anaerobia en la materia orgánica**

La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar, estiércol, [residuos agrícolas](#) o excedentes de cosechas, etc.

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del substrato interviniendo cinco grandes poblaciones de microorganismos. Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por diferentes velocidades de crecimientos y diferentes sensibilidades a cada compuesto intermedio como inhibidor.

La conversión de los residuos orgánicos se lleva a cabo mediante la acción conjunta de diferentes organismos anaerobios que ha servido como patrón para establecer las diferentes etapas que componen al proceso. En la actualidad, se considera que la digestión anaerobia sucede en varias etapas sucesivas.

#### **1. Hidrólisis o licuefacción**

Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.

#### **2. Acidogénesis**

Los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos del hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos simples como es el ácido acético, propiónico y butírico fundamentalmente

3. **Acetogénesis** se le conoce también como acidogénesis intermedia en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

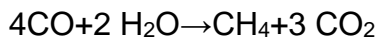
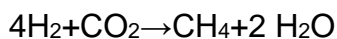
#### 4. Metanogénesis

En esta etapa metabólica el metano es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, pudiendo formarse además a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

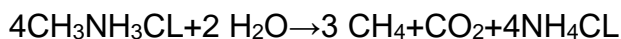
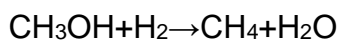
El dióxido de carbono es común en la naturaleza y es un producto importante del metabolismo energético de los organismos químicos, órganos tróficos. Los procariontes reductores de CO<sub>2</sub> más importantes son los metanógenos, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el H<sub>2</sub> como donante de electrones.

Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción de uno u otro metanógeno, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de adenosintrifosfato, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina. Se los divide en tres clases:

##### 1. Sustrato de tipo CO<sub>2</sub>



##### 2. Sustrato con grupo medio



##### 3. Sustrato de acetotróficas



#### 1.3.2. 2. Temperatura de la digestión

La digestión anaerobia y la producción de gas puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas que normalmente va de 4 a 60 °C, siempre y cuando la temperatura se



mantenga constante.

Existen rangos de temperaturas bien específicos en los cuales se observan los mejores resultados en la producción de biogás, estos son:

- Psicofílico (15 a 28 °C)
- Mesofílico (30 a 40 °C)
- Termofílico (45 a 60 °C)

Se observa que los rangos no necesariamente expresan continuidad o solapamiento en los valores de temperaturas debido a que corresponden sólo a las zonas más apropiadas.

En el rango Mesofílico hay un incremento para la generación de biogás desde 30 hasta 40 °C considerándose 35 °C la temperatura óptima.

La caída de temperaturas trae aparejado, entre otros la disminución del PH, el incremento de la concentración de los ácidos grasos volátiles, la disminución del volumen del gas, generando la elevación del contenido en el mismo, esto último debido a la mayor solubilidad del dióxido de carbono en la masa líquida al ser mayor la temperatura.

El análisis integral del efecto de la temperatura sobre la digestión anaerobia, debe considerar la influencia del tiempo de retención de sólidos sobre la conversión, lo cual se explica de la siguiente manera:

Debido a que el tiempo de retención de sólidos es una medida de la concentración de microorganismos por la cantidad de substrato, entonces un aumento de este puede servir de compensación a una disminución en la temperatura de operación y teóricamente mayores deben permitir fluctuaciones de temperaturas sin inhibición del proceso, lo cual se debe a que cuando la velocidad de crecimiento de los microorganismos se encuentre por debajo del máximo, esto puede fácilmente ajustar su actividad metabólica cuando son cambiadas las condiciones ambientales.

### **1.3.2. 3. El pH**

Las bacterias metanogénicas tienen requisitos más estrictos en relación con el pH que las ácido génicas. El pH óptimo se encuentra entre 6,8 y 8,0. Aunque no existe una coincidencia total entre los autores acerca del rango del pH en que debe desarrollarse la digestión anaerobia, pues algunos recomiendan mantenerlo entre 6,8 y 7,6. Sin embargo, la mayoría coincide en afirmar que por debajo de 6,2 se inhibe la metanogénesis, y el proceso se interrumpe.

Las bacterias ácido génicas tienen una mejor tolerancia a los bajos valores del pH y la producción de ácidos puede continuar sin apenas perturbación mientras que se inhibe la etapa consumidora del ácido. El resultado final es que, si no se controla el pH, entonces se inhibe completamente la metanogénesis y el proceso se detiene.

Por ello el control del pH es un parámetro de primera importancia para la digestión anaerobia. Para la mayoría de los residuales líquidos o suspensiones de ellos, el control de la inhibición del pH es necesariamente indispensable sólo durante la arrancada del proceso y en condiciones de sobrecarga, aunque se aconseja mantener un seguimiento de su comportamiento.

En la práctica es necesario vigilar frecuentemente el valor del pH en el digestor y en el efluente.

Las variaciones de pH deben ocurrir fundamentalmente por dos razones:

- El residual es pobre en nitrógeno.
- El residual es fuerte en ácido o alcalino.

### **1.3.2. 4. Nutrientes**

El carbono, además de ser un constituyente básico es la fuente de energía y el nitrógeno proporciona la formación ideal de estos elementos. La materia prima a digerir es de 30 partes de carbono por una de nitrógeno. Esta relación puede llegar hasta 20/1 y considerarse aceptable la proporción mínima de 16/1. Si no existe suficiente nitrógeno, para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción del gas se verá limitada; si el nitrógeno se presenta en exceso, habrá más amoníaco del

necesario y se inhibirá el proceso ya que el amoniaco en exceso resulta tóxico para la digestión anaerobia. La razón de esta diferencia está en la velocidad de consumo de carbono de estos elementos por parte de las bacterias.

### **1.3.2. 5. Tiempo de retención**

El tiempo de retención se acostumbra a diferenciar entre el tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulica. Por definición, el primero es el tiempo promedio de los microorganismos dentro del reactor durante el tratamiento (desde la entrada hasta la salida) a su vez el segundo es el tiempo que el sustrato permanece dentro del reactor. Existen casos particulares, reactores de mezcla completa sin recirculación en los cuales no existen diferencias entre ellos.

La importancia del tiempo de retención de sólidos radica en que existe un mínimo que es necesario garantizar para que los microorganismos tengan la oportunidad de reproducirse en cantidad superior, o al menos a la concentración de estos a la entrada del sistema, de lo contrario ocurrirá el efecto de lavado de la mezcla, ya que los mismo serán eliminados con mayor rapidez que los que entran, bajando su concentración a valores mínimos que conducen a que se detenga el proceso de fermentación anaerobia.

### **1.3.3. Tipos de sustratos empleados en la producción de biogás.**

Los materiales que se pueden usar para la generación de metano son muy variados, por ejemplo: residuos de cosechas: maloja de caña de azúcar, malezas, paja, rastrojo de maíz y otros cultivos; residuos de origen animal: desechos de establos (estiércol, orina, paja de camas), camas de gallinas ponedoras, boñigas de cabras y ovejas, desperdicios de matadero (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero; residuos de origen humano: basura, heces, orina; residuos agroindustriales: tortas de oleaginosas, bagazo, salvado de arroz, desechos de tabaco y semillas, desperdicios del procesamiento de hortalizas y frutas, limos de prensas de ingenios azucareros, residuos de té, polvo de las desmotadoras e industria textil; mantillo forestal: ramitas, hojas, cortezas; plantas acuáticas: camalote, algas marinas.

- Alemania, reporta un incremento en la producción de biogás cuando estos son

mezclados con residuos de excretas por encima a la fermentación de los sustratos por separado, aunque no se reportan las cantidades de biogás que se incrementan por este concepto. La demanda química de oxígeno es la cantidad total de oxígeno (mg) necesaria para oxidar completamente las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un litro de suspensión y se emplea como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable. Otra manera de expresar la cantidad de sustrato disponible es mediante los valores de sólidos totales que es el material remanente después de evaporar a 103 y 105 °C o de sólidos volátiles que es el material orgánico descompuesto a 550<sup>±50</sup> °C.

Otro parámetro de la digestibilidad de los residuos es la demanda biológica de oxígeno que es el consumo de oxígeno, en mg/l de suspensión, durante la degradación por microorganismos durante cinco días a 20 °C. Tanto la demanda biológica de oxígeno como la demanda química de oxígeno son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la primera es más representativa de la degradabilidad de la misma. La relación Carbono/Nitrógeno es determinante en la estabilidad de la fermentación de los excrementos de los animales, considerándose óptima de 16/1 y aunque puede obtenerse biogás a valores mayores no debe superarse la proporción 30/1.

Los volúmenes de gas producido suelen expresarse como m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> digestor o como m<sup>3</sup> biogás/Kg. Demanda química de oxígeno o demanda biológica de oxígeno y difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga/volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo. En general la producción oscila entre 1 y 5 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> digestor, o dicho de otra manera entre 0,3 y 0,5 m<sup>3</sup>/Kg. Sólidos volátiles.

#### **1.3.4. Acondicionamiento del sustrato previo a la producción de biogás**

Antes de introducir los residuos orgánicos dentro del reactor hay que realizar una serie de operaciones de acondicionamiento. Dependiendo del tipo de reactor, el grado de pretratamiento será diferente. La finalidad de estas operaciones es introducir el residuo lo más homogéneo posible, con las condiciones físico químicas adecuadas al proceso al que va a ser sometido, y sin elementos que puedan dañar el digestor.

La forma de acondicionar los residuos de entrada puede ser por pretratamientos, reducción del tamaño de partícula, espesamiento, calentamiento, control de pH, eliminación de metales y eliminación de gérmenes patógenos.

### **1.3.5. Gestión del aprovisionamiento de los subproductos**

Para que una planta de digestión anaerobia sea rentable es imprescindible la garantía en el suministro de materia prima, tanto en tiempo como en calidad.

Además, es muy importante la homogeneidad del sustrato a la entrada del reactor, para conseguir una eficiencia y rendimiento elevado de biogás. Por ejemplo, en plantas de purines, pobres en materia orgánica, y para conseguir la rentabilidad, es necesario el aprovechamiento de los efluentes de algún proceso, como por ejemplo los lodos de espesado, bien como salen o con un tratamiento posterior.

### **1.3.6. Tipos de Biodigestores para la producción de biogás**

De acuerdo al régimen de carga o llenado las plantas de tecnología simple, se distinguen por dos tipos fundamentales

- a) Biodigestores de flujo continuo: mayormente empleados para la obtención de volúmenes considerables de gas; son cargados y descargados en forma periódica, por lo general todos los días. Cualquier tipo de construcción es apropiada para una planta continua, pero el material de fermentación debe ser fluido y uniforme.
- b) Biodigestores de flujo discontinuo: Se emplea para pequeñas producciones de biogás. Estos se cargan una vez y quedan cerrados por un tiempo fijo de retención hasta que haya terminado el proceso de fermentación y no haya producción de gas. El digestor sellado, y la fermentación se realiza entre 30 y 180 días, en dependencia de la temperatura de medio ambiente.

La gran ventaja de los primeros es que las bacterias metanogénicas reciben un suministro estable del material orgánico, por lo que producen biogás de manera más uniforme.

Según su estructura las plantas de tecnología simple más empleadas, pueden agruparse en varios tipos ampliamente desarrollados en la práctica:

- a) Planta de cúpula móvil (Tipo hindú): El digester en forma de bóveda esférica (o cilíndrica) y tiene un depósito de gas móvil en forma de campana flotante. El gas se acumula en la campana, haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de un tubo instalado en la misma campana según se muestra en la Figura 1.

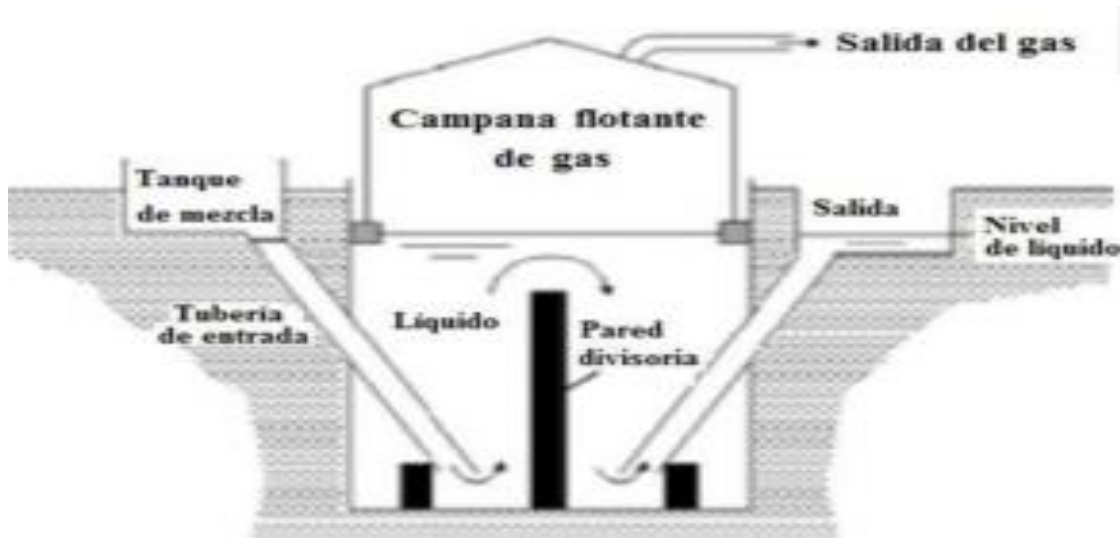


Figura 1.1. Digester de cúpula móvil (Tipo hindú)

- b) Planta de cúpula fija (Tipo chino): Consiste de una cámara de gas construida de ladrillos, piedras o concreto la cual permanece inmóvil y fija. Tanto el tope como la base del reactor son semiesféricos y están unidos por lados rectos. La estructura externa es sellada por varias capas para aislar el gas. Dicho gas durante el proceso es almacenado bajo el domo y desplaza algunos de los contenidos del digester a la cámara del efluente según se muestra en la Figura 1.2.

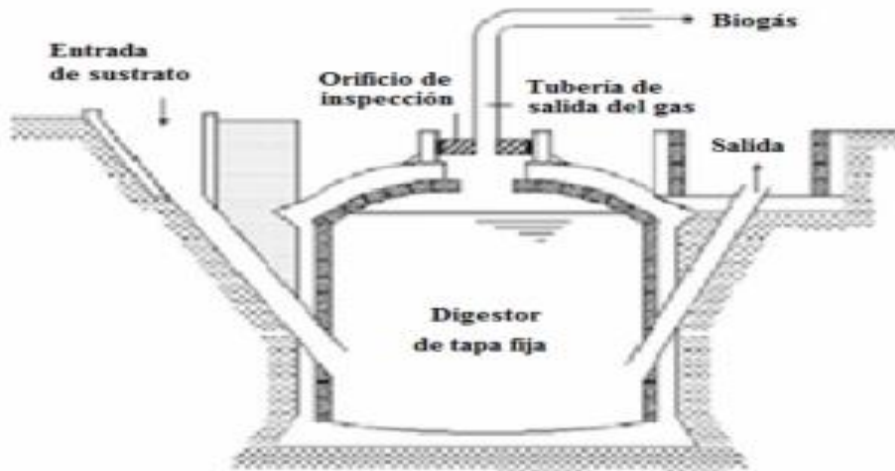


Figura 1.2. Digestor de estructura sólida fija, tanque cilíndrico.

- c) De balón de plástico: Está compuesto por una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geomembrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75 % de volumen) se rellena con la carga, mientras en la parte superior de la bolsa (25 %) se almacena el gas y el gas puede almacenarse en una bolsa separada.

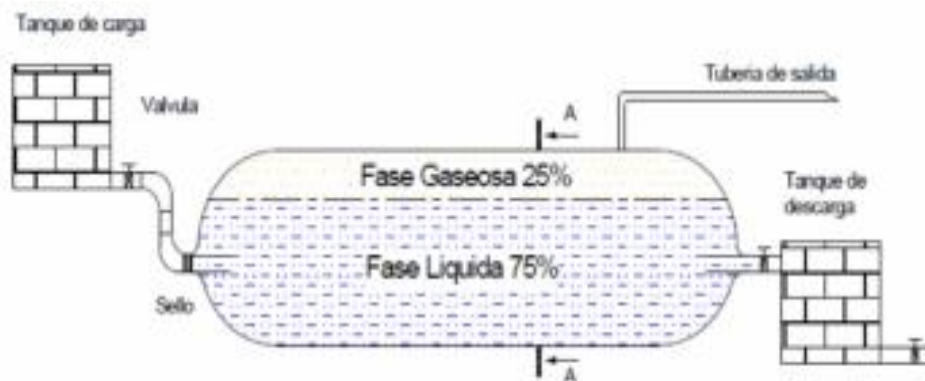


Figura 1.3. Digestor de balón de plástico.

La Tabla 1. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume las características de los digestores más utilizados, y la cual puede servir de guía para la selección del digestor adecuado para cada caso particular de acuerdo con los residuos disponibles y el monto de la inversión requerida.

Tabla 1.1. Características de algunos tipos de biodigestores.

<b>Características</b>	<b>De estructura sólida fija</b>	<b>De estructura sólida móvil</b>	<b>De balón plástico</b>
Cámara de digestión	Esférica/bajo tierra	Esférica/semiesférica	Semiesférica
Presión del gas	No constante	Constante	Muy baja presión de gas, que se aumenta con sobre peso.
Localización óptima	Todos los climas	Todos los climas	Todos los climas
Vida útil	20 años	10 a 15 años	5 años
Ventajas	Bajos costos de construcción. No posee partes móviles, metálicas ni partes expuestas que puedan oxidarse y que comprometan su protección ante bajas temperaturas.	Manejo fácil. El gas almacenado es visible a través del nivel de la campana.	Bajos costos de construcción. Fácil transporte e instalación. Construcción horizontal y plana que favorece en los lugares con alto nivel freático.



Desventajas	La presión puede ser muy alta por eso la cúpula tiene que ser cuidadosamente sellada; porosidades y grietas pueden afectar la planta.	Alto costo de la campana, que en la mayoría de los casos es metálica y por eso sujeta a corrosión y así más costo de mantenimiento por la pintura.	El material plástico está sujeto a daños y tiene que ser protegido.
-------------	---	--	---

Fuente. Difusión de la Tecnología de biogás en Colombia, GTZ, 1987.

### 1.3.7. Generalidades de las etapas fundamentales de la producción de biogás

En este epígrafe se describen las distintas etapas tecnológicas de la producción de biogás con fines energéticos que se deben de tener en cuenta durante la producción de biogás con fines energéticos.

#### ❖ Etapa de pretratamiento

Resulta común que los residuos biodegradables no sean vertidos al medio de manera que se facilite la interacción microorganismo – sustrato. Cuando esto sucede se hace necesario transformar los mismos y para esto se utilizan según convenga etapas de pretratamiento de los sustratos.

Entre los pretratamientos que se reportan se encuentran los físicos, que incluyen los mecánicos y los térmicos (Haug, 1983; Pinnekamp, 1989; Hwang, 1997; Ying-Chih, 1997). El pretratamiento mecánico puede llevar en algunos casos a la disminución del tamaño de los sólidos presentes en el residuo y en otros a la destrucción de las células. Esta técnica de reducción de tamaño incrementa el acceso de los microorganismos, debido a la ruptura de grandes estructuras en cadenas más cortas, de ahí que por esta vía se pueda esperar un mejoramiento de la velocidad y del rendimiento del hidrólisis. Estudios basados en este principio fueron reportados por (Jerger. 1983) donde se encontró que la velocidad de producción de gas (CH<sub>4</sub>) fue significativamente afectada

por el tamaño de partículas (0,003 a 8 mm). Encontrándose los mejores resultados para tamaños de partículas de tres mm. Sin embargo, otros como (Braun, 2002) propone reducir el tamaño de partículas en los residuos de cosecha entre 1 a 2 mm coincidiendo con (Edelman et al, 2000).

También (Ley, 2006) en su tesis doctoral propone reducir el tamaño de los residuos lignocelulósicos hasta 3 mm para mejorar su biodegradabilidad e hidrólisis facilitando el contacto microorganismos – sustrato y ayudando de esta manera a la ruptura de la lignina y la celulosa que son componentes de la mayoría de los residuos agrícolas. Sin embargo, existen otros materiales complejos que aun cuando el tamaño de sus partículas haya sido reducido muestran resistencia a la biodegradabilidad entre ellos los residuos celulíticos la cachaza a los cuales se recomienda realizar un pretratamiento químico (alcalino). (Rodríguez et al, 1992). Existen varias formas de pretratamiento alcalino unas utilizan como álcalis el NaOH y otras el Ca(OH)<sub>2</sub> en ambas se incrementa el área superficial producto del hinchamiento de la celulosa y se produce una disminución de la cristalinidad de la misma mejorando el rendimiento de los sustratos y su biodegradabilidad. (Jerger, 1983; López, 2000). La reducción del tamaño de las partículas se puede lograr con el uso de molinos de cuchillas rotatorias.

#### ❖ **Etapas de empleo de los bioabonos**

Los bioabonos producidos como residual de la producción de biogás tienen una composición media según: (Pérez, 1998 et al, 1998) de N<sub>2</sub> de (1,5 a 2,5) %, P<sub>4</sub> (1,16 a 1,4) %, K (0,7 a 0,9) % por lo que su uso ha contribuido a lo largo del tiempo a la mejora de los suelos sustituyendo agroquímicos causantes del deterioro de los mismos. (Barreto, 2006), en su tesis doctoral, enfoca su análisis en estudios de mercado para lo cual buscando la mejor rentabilidad económica propone ver las plantas de tratamiento anaerobio de residuos como un sistema íntegro en el que deben aprovecharse al máximo todos los productos y subproductos de la digestión anaerobia, esto lo hace refiriéndose fundamentalmente a los ingresos que pueden obtenerse por la venta de los lodos como abonos orgánicos y por la fabricación del compost para alimento animal. También (Obaya, 1999), aborda temas relacionados con el valor agregado que los bioabonos aportan al proceso de producción de biogás con un precio de venta de \$ 20

la tonelada para el caso de los efluentes azucareros tratados, otros reportes atribuyen precios entre 16 a 22 \$/t, según la (Energy Center Wisconsin, 2002). (Miranda, 1986), realiza un análisis de la efectividad económica de las plantas de biogás a partir de diferentes residuales (excretas, mostos de destilería) demostrando que las mismas no son rentables si no se aprovecha al máximo todos sus productos tratados.

El abono tiene un gran valor en una planta de biogás, su total y correcta utilización contribuyen notablemente a sufragar las inversiones de la planta de biogás. Este abono contiene una amplia variedad de minerales, incluyendo una notable cantidad de nitrógeno que es fundamental en el crecimiento de las plantas. Los cultivos de granos pueden ser fertilizados con este abono una o dos veces antes de proceder a la cosecha. El abono producto de la digestión es capaz de producir mejoras en las cosechas entre el 10 y el 20 % por encima del beneficio que reportaría la excreta sin digerir; además de eliminar sensiblemente las plagas, el abono podrá almacenarse hasta que llegue el momento de ser aplicado, existiendo dos formas de almacenamiento del mismo.

- a) Como fertilizante líquido en un foso cubierto o tapado, de manera de minimizar las pérdidas de nitrógeno.
- b) Como abono sólido en un lecho de secado. En este caso se pierde parte del nitrógeno, pero se le pueden añadir otros residuos vegetales (compostado) para incrementar el volumen del fertilizante.

El biogás, al igual que otros gases como el gas licuado presurizado y el gas natural, tiene una gran variedad de usos, tanto doméstico como industrial. Su principal uso doméstico es en las cocinas y el alumbrado, por cuanto no requiere ser purificado.

Los usos más importantes del biogás para determinar la demanda energética del usuario son:

- a) Cocinas. Se emplea con una presión de 75 a 90 mm de H<sub>2</sub>O, a razón de 0.38 a 0.42 m<sup>3</sup> por persona-día. Para presiones inferiores el per cápita debe calcularse a razón de 0.5 m<sup>3</sup>/día. Para comedores obreros se recomienda el empleo de quemadores de cerámica con caudal de 1.2 m<sup>3</sup>/h y diámetro del quemador 170 mm (TECNOLOGÍA

QUÍMICA Vol. XXI, No.3, Universidad de Oriente, 2001).

b) Alumbrado. Si se utiliza una lámpara de 100 candelas (aproximadamente 60 W), esta consume de 0.11 a 0.15 m<sup>3</sup>/h de biogás, requiriendo una presión de 70 a 85 mm H<sub>2</sub>O.

### **1.3.8. Aspectos que se deben conocer al ubicar un biodigestor**

- Seleccionar el lugar más cercano posible a la fuente de materia prima.
- Debe tratarse, por todos los medios, de que la topografía del terreno permita el cargado de la planta por gravedad.
- En el lugar debe existir una fuente de agua para realizar la mezcla y mantener la limpieza de la planta.
- La instalación donde se utilizará el biogás debe encontrarse lo más cerca posible de la planta de biogás ( $L_{\text{máx}} < 0.95 P_{\text{máx}}$ ; donde  $L_{\text{máx}}$  es la distancia máxima en metros; y  $P_{\text{máx}}$ , la presión máxima en milímetros de columna de agua).
- La topografía del terreno debe favorecer que la utilización del bioabono líquido se realice por gravedad.

Se debe evitar el contacto con el manto freático, para prevenir las filtraciones hacia el interior o la contaminación del manto. Como norma, el fondo del biodigestor debe encontrarse a un metro o más del manto freático.

### **1.4. Descripción de la metodología para la producción de biogás**

En correspondencia con lo expuesto los modelos Grupo Biogás de Villa Clara son diseñados y concebidos dentro de la evolución que han experimentados los digestores de cúpula fija partiendo de las bondades del modelo NICARAO (Guardado, 2007); esto no se ciñen a un solo tipo de material ni forma, sino abarcan una diversa gama de posibilidades y situaciones que enfrentan los usuarios que saben comprender la esencia del biogás. Los modelos Grupo de Biogás de Villa Clara, diseñados para condiciones específicas, requieren obligatoriamente de un reconocimiento minucioso del lugar y de una encuesta a los usuarios que de una u otra forma intervienen en el

diseño.

La evolución de los biodigestores de cúpula fija, que ha tenido su expresión más acabada en el modelo NICARAO que ha permitido introducir algunas ventajas como son:

- Posibilidad de hacer extracciones del lodo digerido sistemáticamente, sin alterar su funcionamiento lo que permite un mejor aprovechamiento del lodo y extiende los plazos de mantenimientos.
- Mejor acceso al biodigestor, tanto durante la obra como por futuros trabajos de revisión.
- Mejor aprovechamiento de la excavación.
- Simplificación del método de construcción, lo que permite disminuir el tiempo de ejecución (10 a 15 días).

Su desventaja principal radica en la necesidad de personal calificado para su construcción, y de una inspección periódica y monitoreo por parte de técnicos especializados.

Las ventajas a priori que ofrece el diseño o modelo Grupo de Biogás de Villa Clara, desde el punto de vista técnico – constructivo y por ende económico, para un biodigestor de 12 m<sup>3</sup> de capacidad. Otra ventaja importante de este modelo, es que permite evadir el trabajo en presencia del agua, toda vez que la ubicación del tanque compensador está encima de la cúpula, asegura el peso suficiente para lograr las presiones de trabajo (500 a 800 mm H<sub>2</sub>O) que garantice el traslado del gas a distancias superiores a los 600 m.

### **1.5 Métodos de separación solido- liquido**

Es necesario hacer una separación solido-liquido del sustrato antes de entrar al biodigestor ya que el pH de la orina suele ser perjudicial para los microorganismos encargados de la degradación de la excreta y para esto existen diversos métodos de separación de soluto y líquido que se utilizan en diferentes aplicaciones industriales, científicas y cotidianas. Estos métodos son fundamentales para obtener sustancias

puras o para separar componentes específicos de una solución líquida. A continuación, te presentaré algunos de los métodos más utilizados:

1. Destilación: La destilación es un método de separación basado en las diferencias de punto de ebullición de los componentes de una mezcla líquida. Consiste en calentar la mezcla hasta que uno de los componentes alcance su punto de ebullición y se evapore, luego se condensa el vapor y se recoge como producto puro. Este método es ampliamente utilizado en la industria para la producción de bebidas alcohólicas, combustibles y productos químicos.

2. Extracción líquido-líquido: Este método se basa en la diferente solubilidad de los componentes de una mezcla en dos solventes líquidos inmiscibles entre sí. Al agregar el solvente adecuado a la mezcla, se forma una fase líquida que extraerá selectivamente uno de los componentes, mientras que el resto de los componentes permanecerá en la otra fase líquida. Esta técnica se utiliza, por ejemplo, en la industria farmacéutica para separar y purificar compuestos activos de plantas medicinales.

3. Cromatografía: La cromatografía es un método de separación basado en la diferencia de afinidad de los componentes de una mezcla por una fase estacionaria y una fase móvil. Consiste en hacer pasar la mezcla a través de una columna o placa que contiene la fase estacionaria, mientras que una fase móvil se mueve a través de ella arrastrando los componentes. A medida que la fase móvil se desplaza, los componentes se separan según sus velocidades y afinidades por la fase estacionaria. Este método se utiliza ampliamente en química analítica para analizar y separar diversos compuestos.

4. Filtración: La filtración es un método de separación utilizado para separar sólidos insolubles de un líquido. Se basa en el uso de un medio poroso, como un papel de filtro o un tamiz, que permite el paso del líquido, pero retiene las partículas sólidas. Se utiliza comúnmente en laboratorios y en la industria alimentaria para eliminar impurezas sólidas de líquidos.

5. Electrólisis: Este método de separación se basa en el uso de corriente eléctrica para descomponer una solución acuosa en sus componentes constituyentes. La electrolisis utiliza celdas electroquímicas donde los iones presentes en la solución se mueven

hacia los electrodos cargados negativa y positivamente. Esto permite la separación de los componentes de la solución, como la obtención de oxígeno e hidrógeno a partir del agua.

Estos son solo algunos de los diversos métodos de separación sólido-líquido que existen. Cada método se aplica en función de las propiedades de los componentes y el objetivo de la separación. Es importante seleccionar el método más adecuado en cada caso para lograr una separación eficiente y obtener los resultados deseados.

### **1.6. Conclusiones del capítulo I**

- La revisión bibliográfica permitió identificar los diferentes tipos de digestores agrupando sus características y parámetros técnicos que pudieran servir de base de datos para futuros trabajos.
- En la exploración del estado del arte se estudian varias investigaciones que sirven de referencia para el desarrollo de este trabajo.
- Se exponen con profundidad los principios de la digestión anaerobia y su importancia en la descomposición de la materia orgánica y en la estabilización de los lodos.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2. Caracterización de la finca “El Algarrobo”**

La finca “El Algarrobo” perteneciente a la UBPC las Guácimas está situada en el municipio Santiago en el kilómetro 10 de la carretera de Siboney ,1/2 el Brujo perteneciente a la provincia de Santiago de Cuba.

#### **2.1. La contaminación generada por la granja porcina**

La granja porcina generalmente afecta al microambiente (la granja misma) y al ambiente en general. En lo que respecta al microambiente, se ha visto que la exposición a los gases producidos (amoníaco, sulfuro de hidrógeno, metano y bióxido de carbono) representa riesgos directos a la salud de los trabajadores y de los cerdos de la explotación. Esto es debido a que el amoníaco es irritante por lo que tiende a producir malestar en los cerdos, Drummond et al., (1980) constataron un decremento (del 12 al 30%) en la ganancia diaria de peso de cerdos alojados en lugares con concentraciones crecientes de amoníaco (50, 100 y 150 ppm). El amoníaco proviene del nitrógeno excretado principalmente en la orina (85%) y en las heces (15%) y su tasa de volatilización depende de la relación existente entre los iones amonio y amoníaco la cual depende del pH de la excreta (Hoeksma et al., 1992). Así mismo, la producción de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) contribuye al efecto invernadero mundial, aunque en mucho menor escala que el CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> producidos por los rumiantes (Kirchgessner et al., 1990). Sin embargo, el principal problema ocasionado por las excretas es la contaminación química debida a la excreción de grandes cantidades de nitrógeno (en forma de nitratos), fósforo y potasio (Vanderholm, 1979; PeetScwering et al., 1999), estos últimos autores, estimaron que bajo condiciones comerciales de producción en Holanda el fósforo consumido es excretado en proporciones variables, ya que una cerda excreta alrededor del 75%, los lechones destetados el 38% y los cerdos de abasto el 63%, la vía de excreción del fósforo es principalmente fecal; en lo referente al nitrógeno la proporción excretada para las mismas categorías de animales fue de 76, 46 y 67% respectivamente y este es excretado principalmente vía urinaria.



## **¿QUÉ SON LAS EXCRETAS?**

Para intentar una mejora en el manejo y utilización de las excretas es necesario que se conozca con más precisión lo que son. Un modo simple de lograrlo, es sabiendo dónde, cuánto, cómo y a partir de que se origina. Hay dos formas de cómo se pueden considerar las excretas: Como desecho de la alimentación de los animales sin pensar en ningún tipo de tratamiento, o bien como materia para reciclaje.

1. Como desecho de los animales: Su origen está en los alimentos que se proporcionan a los animales, de los cuales el organismo toma los nutrientes necesarios para su mantenimiento, producción y reproducción; se le agregan elementos de la digestión no utilizados por el metabolismo, los cuales ya mezclados se expulsan fuera del mismo y dan como resultado las heces y orina.

2. Como materia prima para procesos de reciclaje: Tiene como origen las heces y orines recién expulsados, los cuales están constituidos por el sobrante del alimento ya digerido pero no utilizado por el organismo, aparte se le suman desperdicios como camas, residuos de comida o material añadido de forma deliberada para aumentar la materia seca y así asegurar satisfactoriamente su manejo durante el almacenamiento y transporte (Grundey, 1982), viéndose afectado por el tipo de alimento y por el organismo en el cual se ha formado.

### **2.2. Según algunos autores así se calcula la cantidad de excreta por peso de un cerdo**

Se han realizado varios cálculos para estimar la cantidad de excreta (heces + orina + agua) que se producen en una explotación porcina; a continuación se enumeran algunos de ellos: Pérez Espejo (1992) menciona que por cada 70 kg de peso vivo en granja, se producen entre 4 y 5 kg de excreta, por su parte Gadd (1973) menciona que el promedio de producción de excretas en engorda, puede ser un décimo del peso vivo por día (sólido y líquido), lo que representa 1.36 kg de heces y 4.73 l de orina por día en promedio desde el destete hasta el peso al sacrificio; Penz (2000) proporciona datos del volumen diario de excretas producidas por tipo de cerdo (Cuadro 1); Sweeten (1979) estima la cantidad anual producida por unidad cerda (lo que equivale a una hembra

más los cerdos producidos por ella en un año), cantidad que representa 13 ton de excretas por año, con un contenido de 10% de materia seca. Guardado (2007), por cada 50 kg de cerdo se obtienen 2,25 kg de excreta, generándose 0,10 m<sup>3</sup> de biogás/día, con una proporción de 1:1-3 de excreta-agua

Cuadro 1. Producción diaria de excretas según el tipo de cerdo

Etapa	Estiércol kg/día	Est. + orina kg/día	Volumen l/día	Volumen m <sup>3</sup> /animal/mes
25-100 kg	2.3	4.9	7.0	0.25
Hembra	3.6	11.0	16.0	0.48
H. lactación	6.4	18.0	27.0	0.81
Semental	3.0	6.0	9.0	0.28
Lechón	0.35	0.95	1.4	0.05
Promedio	2.35	5.8	8.6	0.27

Sin embargo, es de remarcar que la cantidad producida de excretas varía básicamente por los siguientes factores: los ligados a las instalaciones y al equipo y los ligados al animal y al alimento, (Dourmand, 1991) ver Figura 1.4

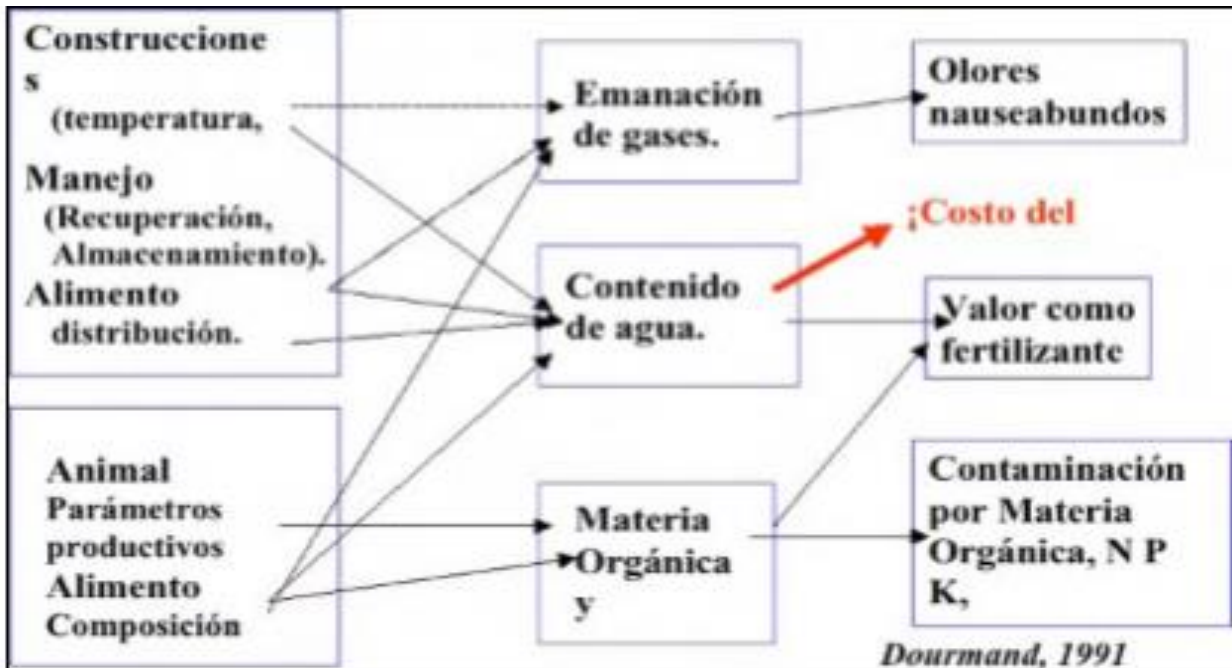


Figura 1.4 Principales factores que afectan la cantidad y composición de las excretas.

Los factores ligados a las instalaciones afectan principalmente el contenido de agua de las excretas, así como la emanación de gases, por su parte los factores ligados al animal y al alimento influyen directamente sobre la composición química de las excretas, ya que la excreción corresponde a la proporción de un nutrimento contenido en el alimento que no es retenido por el animal (Dourmand, 1991); la cantidad retenida depende a su vez de la composición del alimento y de la capacidad del animal por fijar (depositar) los diferentes nutrimentos, principalmente el nitrógeno y el fósforo. Por lo que la composición química (Cuadro 1) y por lo tanto el poder contaminante de las excretas es muy variable y depende básicamente de la calidad del alimento, del programa de alimentación y de la capacidad productiva de los cerdos de una granja.

### 2.3. Diagnóstico de las potencialidades de energía renovable de La finca “El Algarrobo” en Santiago de Cuba

El uso de la biomasa que es un recurso renovable no sólo energéticos, sino que su transformación se convierte en beneficiosa y necesaria para el entorno. Es un sistema idóneo de eliminación de residuos, con la subsiguiente mejora del ambiente rural o urbano; además puede ser un modo de equilibrar determinados excedentes agrícolas.

En el sector agropecuario la opción del uso del biofertilizante generado por esta tecnología permite responder a una demanda de la agricultura promoviéndose la reducción de posibles fuentes contaminantes. En el presente capítulo se presenta la prospección y selección del potencial de energía renovable, a partir de un levantamiento de la generación de excrementos en La finca “El Algarrobo”.

Se trata de una investigación en la que se obtiene una propuesta para la utilización tecnológica del potencial de la biomasa con fines energéticos, a partir de los residuos existentes en La finca “El Algarrobo”; para dicho proyecto se realiza un estudio en esta entidad

### **2.3.1. Determinación del potencial energético de la biomasa en La finca “El Algarrobo”**

Para la determinación del potencial energético de la biomasa se realiza un levantamiento de la capacidad de generación de excrementos en la finca, estimándose las cantidades. (Tabla 3 )

#### **Calculando la cantidad de excreta en Kg por peso**

Según Guardado (2007), por cada 50 kg de peso vivo se estima 2,25 kg de excreta/día, generándose 0,10 m<sup>3</sup> de biogás/día, con una proporción de 1:1-3 de excreta-agua entonces:

Aplicando el principio de proporcionalidad tenemos que

$$\frac{2,25}{50} = \frac{x}{130} \quad (1)$$

$$50x = 2,25 * 130$$

$$x = 2,25 * \frac{130}{50}$$

$$x = 5,85 \text{ Kg}$$

Este método de cálculo es aplicable para todas las relaciones de peso existente en la

### 2.3.1.2. Estimación del potencial de substratos

Con el potencial de residuos producidos por animal y su peso vivo promedio, se estima la cantidad de desechos orgánicos producidos diariamente en la finca, y los requerimientos de adición de agua para la mezcla y homogenización.

Tabla 2.1. Datos de entrada y salida requeridos para el diseño de un biodigestor anaerobio de cúpula fija.

Parámetros	Unidad
<b>Datos de entrada</b>	
Cantidad de biomasa diaria generada (Bmd)	$Kg/día$
Proporción excreta-agua (N)	$L/Kg$
Rendimiento de biogás (Y)	$m^3/Kg$
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	$día$
<b>Datos de salida</b>	
Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (Vdm)	$m^3/día$
Volumen del biodigestor (Vbiodig)	$m^3$
Volumen de la cámara de fermentación (Vcf)	$m^3$
Volumen del cilindro (V1)	$m^3$
Volumen de contención del biogás (V2)	$m^3$
Volumen del cono base (V3)	$m^3$
Volumen del tanque de compensación (Vtc)	$m^3$

La cantidad de biomasa diaria generada (Bmd), expresada en Kg/día, se determina a través de la expresión:

$$Bmd = Ca * Ce * Rp * Rt \quad (1.1)$$

Donde Ca es la cantidad de animales, Ce la cantidad de excreta por animal (kg/día), Rp, la relación entre el peso vivo promedio de la población animal y el peso vivo equivalente tabulado y Rt la fracción entre el tiempo de estabulación respecto a la duración del día (h/día).

$$Bmd = Ca * Ce * \left(\frac{PVp}{PVe}\right) * \left(\frac{Te}{24h}\right) \quad (2)$$

PVp es el peso vivo promedio de la población animal (kg), PVe el peso vivo equivalente tabulado, Te las horas que el animal permanece estabulado (h/día). El volumen diario de material (Vdm), mezcla estiércol y agua, no es más que la suma del residual y la dilución de la biomasa (residual y agua).

$$Vdm \left(\frac{m^3}{dia}\right) \quad (3)$$

N es la proporción excreta-agua (L/kg), se requiere conocer que la densidad del agua es 1000 kg/ m3. Luego, el valor obtenido se expresa en kg/día, pero al considerarse la densidad volumétrica del agua, se divide este valor por dicha densidad, entonces se expresaría en m3/día. El volumen del biodigestor (Vbiodig) se calcula teniendo en cuenta el valor del volumen de material mezcla estiércol y agua (Vdm) que entra al biodigestor y el tiempo de retención (TRH).

$$V_{biodig} (m^3) \quad (4)$$

Una vez determinado el volumen del biodigestor, se calcula el volumen de diseño a partir de dos posibles opciones:

- Tratar todo el residual y obtener los subproductos derivados.
- Tratar solamente la parte del residual que garantice la energía requerida.

Las expresiones fundamentales que se emplean para el dimensionamiento de un biodigestor de cúpula fija, caracterizado por sus partes cónica, cilíndrica y casquete esférico, se plantean a continuación. Partes principales en las que se divide un biodigestor de cúpula fija (Guardado, 2007).

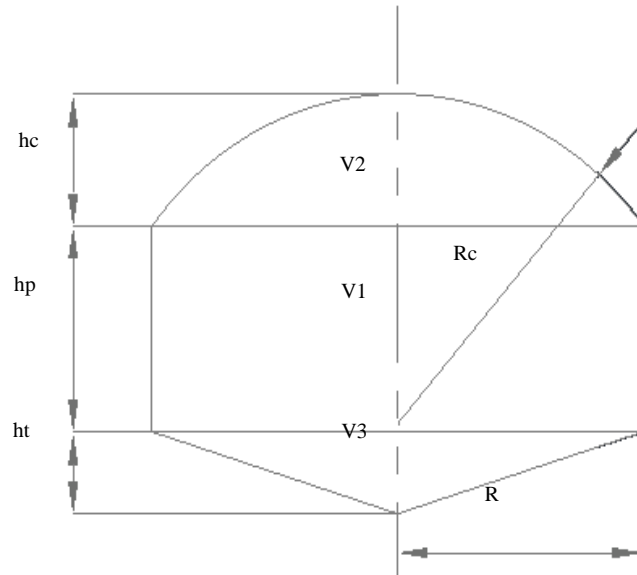


Figura 1.5. Parámetros a calcular en un digestor.

Los pasos a seguir para su empleo son los siguientes:

- Se calcula el volumen total del biodigestor ( $V_{biodig}$ ), sobre la base del volumen de la mezcla agua-estiércol y el tiempo de retención, como se mostró en la expresión 4.
- Se calcula el radio del volumen predefinido (R).

Para calcular el radio del volumen predefinido (R), se plantea la expresión 5: R (m)

$$R = \sqrt[3]{\frac{V_{biodig}}{\pi * 1,121}} \quad (5)$$

Teniéndose el radio del volumen predefinido (R), se procede a determinar la unidad proporcional (U) en metros (expresión 6): U (m)

$$U = R/4 \quad (6)$$

La unidad proporcional permitirá determinar el resto de las denominaciones, sustituyendo U en las proporciones siguientes:

Rc (m)

$$Rc = 5 * U \quad (7)$$

D (m)

$$D = 8 * U \quad (8)$$

hc (m)

$$hc = 2 * U \quad (9)$$

hp (m)

$$hp = 3 * U \quad (10)$$

ht (m)

$$ht = 0,15 * D \quad (11)$$

En las expresiones 7, 8, 9, 10 y 11, dadas en metros, Rc es el radio de la cúpula, D el diámetro, hc la altura de la cúpula, hp la altura del cilindro y ht la altura del cono base. A partir de la determinación de los principales parámetros geométricos se procede a calcular los volúmenes correspondientes al cilindro (V1), de contención del biogás (V2), cono base (V3) y volumen de la cámara de fermentación (Vcf) (expresiones 12, 13, 14 y 15):

V1 (m)

$$V_1 = R^2 * hp * \pi \quad (12)$$

V2 (m)

$$V_2 = \frac{\pi * hc^2}{3} (3R - hc) \quad (13)$$

V3 (m)

$$V_3 = R^2 * \pi * \left(\frac{ht}{3}\right) \quad (14)$$



Vcf (m)

$$V_{cf} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (15)$$

Posteriormente se procede al cálculo del volumen diario de biogás producido (G):

G (m3/día)

$$G = Y * Bmd \quad (16)$$

En la expresión 16, Y es el rendimiento de biogás, dado en m3/día (Tabla 2.1 ). Esta variable se determina en la expresión 17, donde Ce, analizada en la expresión 1, es la cantidad de excreta por animal (kg/día) y X es el coeficiente de conversión energética de la excreta producida diariamente, o sea, la producción diaria de biogás en función del tipo de residuo orgánico.

Y (m3/día)

$$Y = \frac{X}{C_e} \quad (17)$$

Para todos los tipos de biodigestores, el volumen del tanque de compensación (Vtc) es equivalente al volumen de gas producido, o sea, oscila entre el 25 y 30 % del volumen del biodigestor. (18)

### **Discusión los parámetros fundamentales del biodigestor**

Para el correcto dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija se requiere determinar los parámetros siguientes:

- Cantidad de biomasa diaria generada (Bmd)
- Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (Vdm)
- Volumen del biodigestor (Vbiodig)
- Volumen de la cámara de fermentación (Vcf)
- Volumen del cilindro (V1)

- Volumen de contención del biogás (V2)
- Volumen del cono base (V3)
- Volumen del tanque de compensación (Vtc)

Los resultados obtenidos de cada uno de estos parámetros se representan en la Tabla 3, estos valores se obtienen a partir del movimiento del rebaño concebido por en la granja.

Aporte energético potencial Para determinar el aporte energético potencial a obtener en función de la cantidad de animales disponibles, se requieren los parámetros siguientes:

- Rendimiento de biogás (Y)
- Volumen diario de biogás (G)

Considerándose lo planteado por varios autores, entre ellos Guardado (2007), por cada 50 kg de cerdo se obtienen 2,25 kg de excreta, generándose 0,10 m<sup>3</sup> de biogás/día, con una proporción de 1:1-3 de excreta-agua (tomándose una proporción de 1:1) y con un tiempo de retención recomendable de 40 días. Se determina los parámetros fundamentales del biodigestor requerido para la cantidad de animales analizada en la Tabla 3 y el aporte energético de la población animal (

Tabla 5)

Como se evidencia en la

Tabla 5 , la mayor cantidad de biomasa diaria generada, se obtiene en la categoría ceba, representando el 82 % de la cantidad de biomasa diaria generada total, este resultado se debe, fundamentalmente, a la cantidad de animales existentes en esta categoría. Por otro lado, la categoría de ceba es la que más influye en el dimensionamiento del sistema de biodigestor, dado que representa el porcentaje de mayor representatividad para la determinación de los volúmenes del cono base, las paredes laterales (sección cilíndrica) y la cúpula (semiesfera superior), así como del biodigestor, la cámara de fermentación y el tanque de compensación. Como se representa en la

Tabla 5 ,el rendimiento de biogás a obtener, según la especie, es de 0,044 m<sup>3</sup>/kg y para esa cantidad de animales estabulados es posible obtener un volumen diario de producción de gas total de 284,94 m<sup>3</sup>/día. Considerándose los valores reflejados en la Tabla 3, se propone la instalación de 3 biodigestor de cúpula fija de 100m<sup>3</sup>. En la Tabla 7 se muestra el aporte energético del biogás que se obtendrá con la instalación de la tecnología propuesta en el estudio. Como se evidencia en la Tabla 3 y la

Tabla 5, la instalación de biodigestores en unidades de producción agropecuaria constituye una opción energéticamente viable, a lo cual habría que añadir la contribución a la conservación y cuidado del medioambiente.

Según lo expuesto den el epígrafe 1.3.3. 3. El pH es necesario un sistema de separación eficiente solido-liquido ya que el líquido(orina) que viene de conjunto con la excreta puede alterar el pH del sustrato dentro del biodigestor esto afecta la producción de biogás matando a los microorganismos encargados de proceso siendo nula la producción de dicho gas.

Un método de separación sólido-líquido es esencial en numerosas industrias y procesos, ya que permite la separación eficiente y efectiva de partículas sólidas de un líquido. En el contexto de esta investigación se hace una propuesta de diseño, podemos explorar un método que involucra una semi esfera con un eje central que contiene tres brazos equipados con rodillos y escobillas en cada punta según se muestra en la Figura 1.6

El diseño descrito tiene como objetivo principal el separar partículas sólidas del líquido de una manera controlada y precisa. La semi esfera actúa como una especie de dispositivo de contención, donde el líquido con las partículas sólidas ingresa y se dirige hacia los brazos de manera uniforme.

En el eje central, se encuentran los tres brazos que están estratégicamente colocados para maximizar el contacto con el líquido. Cada brazo está equipado con un rodillo en la punta más alejada de la semi esfera, y una escobilla en la punta más cercana. Estos elementos juegan un papel fundamental en el proceso de separación.

Cuando el líquido con las partículas sólidas ingresa en la semi esfera, el movimiento rotatorio del diseño provocará que las partículas sólidas sean arrastradas hacia los rodillos de los brazos. Estos rodillos, al tener una superficie rugosa o texturizada, proporcionan una fricción adecuada para despegar y separar las partículas del líquido. A medida que las partículas se desprenden, son recogidas por las escobillas ubicadas en la punta más cercana de los brazos.

Las escobillas, que pueden estar fabricadas con cerdas de materiales resistentes y flexibles, tienen como función principal recoger las partículas sólidas y ayudar a su transporte hacia una salida o depósito adecuado. El diseño de los brazos con múltiples rodillos y escobillas permite una mayor capacidad de separación y recolección, aumentando la eficiencia del proceso.

Es importante tener en cuenta que este diseño propuesto puede ser adaptado y ajustado según los requisitos específicos del proceso de separación sólido-líquido en cuestión. Factores como la viscosidad del líquido, el tamaño y naturaleza de las partículas sólidas, así como los requerimientos de caudal y rendimiento, pueden influir en la optimización y personalización del diseño.

En resumen, el diseño con una semi esfera, un eje central con tres brazos equipados con rodillos y escobillas, proporciona una solución práctica y eficiente para la separación sólido-líquido. Este método permite una separación controlada y efectiva de las partículas sólidas del líquido, mejorando así la calidad y pureza del sólido resultante.

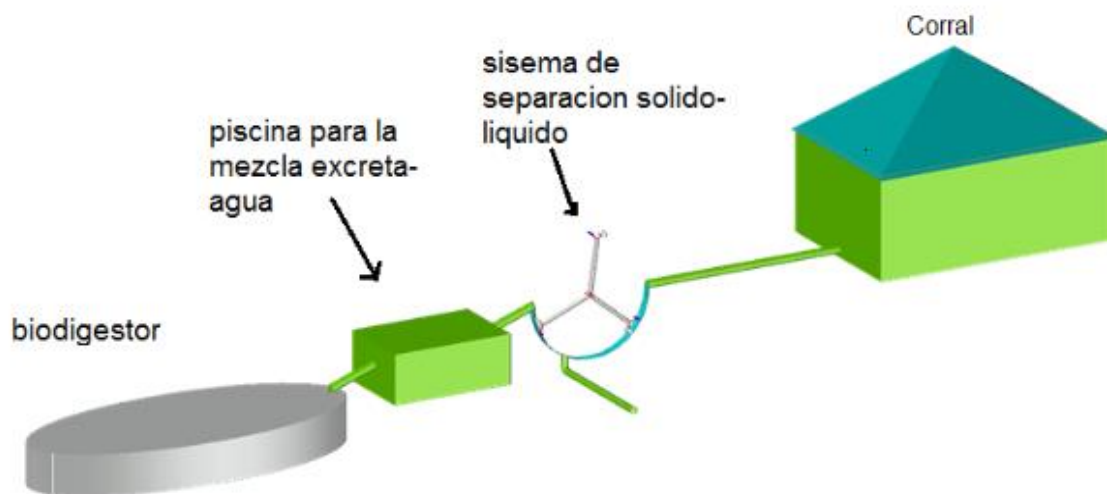


Figura 1.6. Propuesta de diseño para la separación solido-liquido. Semiesfera con un eje central que contiene tres brazos equipados con rodillos y escobillas en cada punta. Siguiendo el modelo del tipo decantación

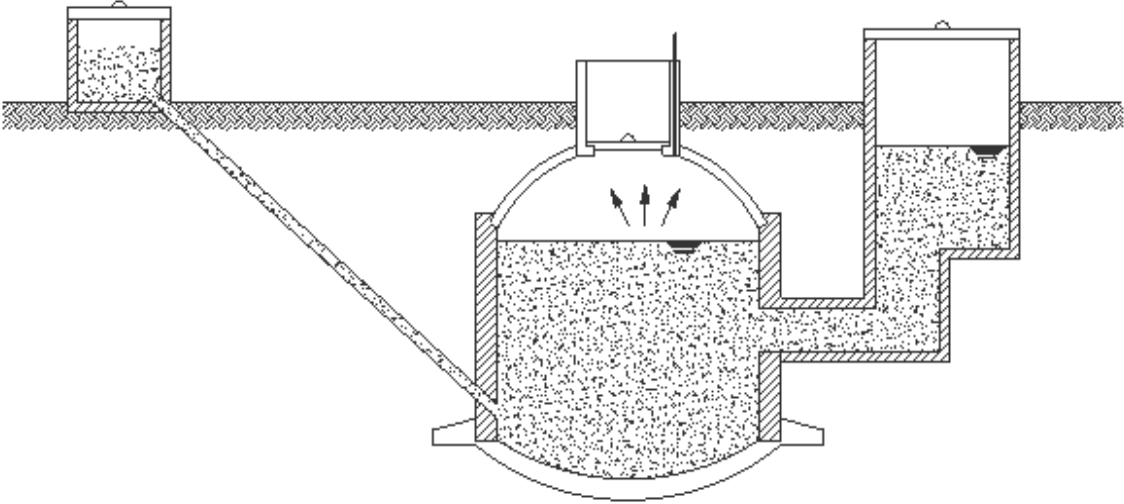


Figura 1. 7. Sistema instalación de biodigestor

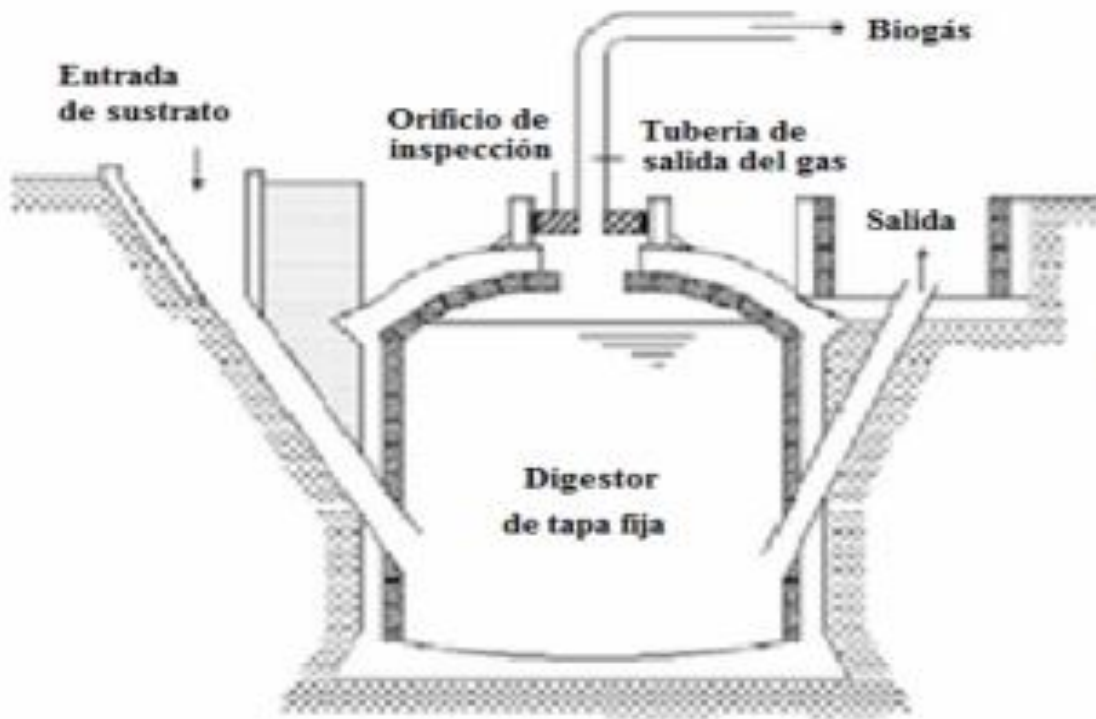


Figura 1.8. Sistema instalación de biodigesto

### **CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA-SOCIAL E IMPACTO AMBIENTAL**

Este capítulo tiene como objetivo presentar los resultados de la caracterización energética de la Granja “El Algarrobo”, estrechamente relacionado con el análisis de las potencialidades de la biomasa producción de biogás y bioabono.

Teniendo en cuenta la metodología descrita en el capítulo II y considerando las mediciones realizadas, se procedió al cálculo de los parámetros fundamentales de explotación del biodigestor, los resultados obtenidos se muestran en la

Tabla 5

Un subproducto que también obtenemos del proceso de digestión anaerobia es el bioabono, también conocido como abono orgánico, es un fertilizante natural compuesto por materiales biodegradables que provienen de residuos orgánicos en este caso de la excreta porcina. A diferencia del abono químico, el bioabono ofrece una serie de beneficios tanto en términos de costos como de utilidad, lo cual lo convierte en una opción superior para el enriquecimiento del suelo y el crecimiento saludable de las plantas.

Una de las ventajas más destacadas del bioabono es su menor costo en comparación con el abono químico. Las materias primas utilizadas en su producción son fuentes abundantes y económicas, lo cual permite reducir significativamente los gastos asociados a su obtención. Esto beneficia tanto a los pequeños agricultores como a los consumidores finales, ya que se traduce en una menor inversión en fertilizantes y, potencialmente, un menor costo de los alimentos producidos de manera sostenible.

Además de su costo accesible, el bioabono proporciona una serie de beneficios en términos de utilidad agrícola. En primer lugar, el bioabono mejora la estructura del suelo, incrementando su capacidad de retención de agua y aireación, lo cual es fundamental para el desarrollo de raíces saludables y el acceso a nutrientes. Esto tiene como resultado un crecimiento más vigoroso de las plantas y una mayor resistencia a enfermedades y plagas.

Otro beneficio del bioabono radica en su capacidad para enriquecer el suelo con nutrientes esenciales de manera equilibrada y sostenible. A diferencia del abono químico, que suele contener altas concentraciones de nutrientes específicos, el bioabono proporciona una amplia gama de elementos nutritivos, incluyendo nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes, en proporciones más balanceadas. Esto promueve un crecimiento uniforme y saludable de las plantas, evitando desequilibrios y excesos que podrían ser perjudiciales tanto para el cultivo como para el medio ambiente.

Además de sus beneficios agrícolas, el uso de bioabono contribuye a la sostenibilidad y protección del medio ambiente. Al reciclar y reutilizar residuos orgánicos, se reduce la cantidad de desechos enviados a los vertederos y se evita la generación de gases de efecto invernadero. De esta manera, se promueve una gestión más responsable de los recursos naturales y se contribuye a la lucha contra el cambio climático.

En resumen, el bioabono destaca como una opción superior al abono químico debido a sus beneficios de costo y utilidad. Su menor costo, combinado con su capacidad para mejorar la estructura del suelo, enriquecerlo con nutrientes equilibrados y promover prácticas agrícolas sostenibles, lo convierte en una opción preferida para los agricultores y consumidores conscientes. Al elegir el bioabono, no solo se obtienen beneficios económicos, sino que también se contribuye a la protección del medio ambiente y a la producción de alimentos más saludables y sostenibles.



Tabla 3. Movimiento del rebaño por categoría.

Categorías	Cantidad de animales en cada categoría	Masa promedio por peso en Kg de cada categoría	Cantidad de excreta en Kg por peso	Fórmula
Sementales	10	130	5,85	(1)
Cochinatas	78	100	4,5	(1)
Cebas	1450	90	4,05	(1)
Pre cebas	650	25	1,12	(1)
Crías	350	7	0,31	(1)
Total de animales en la granja	2538	Masa animal promedio en Kg	70,40	

Tabla 4. Ya obtenida la cantidad de excreta en Kg por peso entonces podemos calcular la cantidad de excreta por categoría

Categorías	Cantidad de animales en cada categoría	Cantidad de excreta en Kg por categoría
Sementales	$10 \times 5,85$	58,5
Cochinatas	$78 \times 4,5$	351
Cebas	$1450 \times 4,05$	5872,5
Pre cebas	$650 \times 1,12$	731,25
Crías	$350 \times 0,31$	110,25

Total de excretas en la granja por día aproximadamente	7123,5
--	--------

Tabla 5. . Dimensionamiento del biodigestor diseñado en función de la cantidad de animales

Fuente de materia prima	Animal por día	Masa promedio (kg)	Bmd (kg/día)	Vdm (m3/día)	Vbiodig (m3)	V1 (m3)	V2 (m3)	V3 (m3)	Vcf (m3)	Vtc (m3)
Sementales	10	130	58.5	0.06						
Cochinatas	78	100	351	0.35						
Cebas	1450	90	5872.5	5.87						
Pre cebas	650	25	731.25	0.73						
Crías	350	7	110.25	0.11						
Total	2538	70,40	7123.5	7.12	284.94	189.84	52.73	25.31	267.88	94.98
Fórmula			(1.1)	(3)	(4)	(12)	(13)	(14)	(15)	(18)

Tabla 6. Aporte energético de la población animal

Fuente de materia prima	Animal por día	Masa promedio (kg)	Bmd (kg/día)	Y (m3/kg)	G (m3/día)
Sementales	10	130	58.5	0,044	2.6
Cochinatas	78	100	351		15.6
Cebas	1450	90	5872.5		261
Pre cebas	650	25	731.25		32.5
Crías	350	7	110.25		4.9
Total	2538	70,40	7123.5		316.6
Fórmula			(1.1)	(17)	(16)

Tabla 7. Aporte energético del biogás a obtener con la instalación propuesta

Parámetros de dimensionamiento	Biodigestor propuesto	Fórmula	Costo en moneda nacional
Vbiodig (m3)	284.94	(4)	
Vcf (m3)	267.88	(15)	
Vtc (m3)	94.98	(18)	
Vgas (m3)	94.98	(18)	
<b>Parámetros energéticos</b>	<b>Biodigestor propuesto</b>		

Y (m3/kg)	0,044	(17)	
G (m3/día)	316.6	(16)	
<b>Ahorro energético potencial</b>	<b>Biodigestor propuesto</b>		
Energía eléctrica (kWh)	110		26,4
Gas natural (m3)	5,30		15560
Madera (kg)	167,02		1200

Resulta válido señalar que el correcto dimensionamiento de este tipo de tecnologías propicia el aprovechamiento máximo de los desechos obtenidos en los escenarios productivos

### **Conclusiones del capítulo III**

Se hizo una propuesta de un biodigestor de cúpula fija adecuado para la granja (Porcina) "El Algarrobo", considerándose para ello la cantidad de animales (porcinos), potencial a establecer en la misma, el movimiento de rebaño concebido por la dirección del área y la cantidad de biomasa diaria generada. A pesar de los costos elevados por concepto de materiales para este tipo de tecnología (biodigestor de cúpula fija) se demostró el ahorro energético, la preservación del medioambiente y la disponibilidad local de los materiales requeridos, aspecto que no limita la ejecución de la obra ingenieril.

## CONCLUSIONES

La presente tesis se enfocó en el aprovechamiento de la biomasa residual del porcino, específicamente en la finca El Algarrobo, con el objetivo de proponer un biodigestor de cúpula fija que permita obtener bioabono como subproducto resultante. A lo largo del estudio, se ha analizado la viabilidad de este proceso en términos técnicos, económicos y ambientales dando cumplimiento:

1. Se determinó la potencialidad de biogás resultante de excreta porcina en metros cubico/día para un total de 7.12 ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) y 284.94 ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) en un tiempo de retención de 40 días en la granja estudiada.
2. Se desarrolló los cálculos de los parámetros de dimensionamiento correspondiente al diseño más eficiente de un biodigestor de cúpula fija atendiendo a la metodología del grupo de biodigestores de Villa Clara (GBV) en correspondencia a las necesidades existente en dicha instalación, a partir de las excretas porcinas.
3. En términos técnicos, se ha evaluó la capacidad del biodigestor propuesto para procesar la biomasa residual del porcino, donde los resultados indican una eficiencia prometedora en la producción de biogás. Asimismo, se ha observado una digestión efectiva de los componentes orgánicos, lo que garantiza la estabilidad y maduración adecuada del bioabono.
4. Se logró una breve valoración cualitativa y cuantitativa desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental el uso del material biodegradable (excreta porcina).

## RECOMENDACIONES

La investigación y desarrollo de proyectos que buscan el aprovechamiento de la biomasa residual se ha convertido en una necesidad urgente en el ámbito de la sostenibilidad, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental que generan ciertos sectores industriales, como el porcino, por lo cual arribamos a la siguiente recomendación:

1. De acuerdo a los volúmenes determinados de material biodegradable (excreta porcina) y la capacidad del biodigestor propuesto se recomienda el diseño de 6 biodigestores de 50(m<sup>3</sup>) para el tratamiento total de la cantidad de biomasa generada para que permita eliminar el impacto negativo al medio ambiente que hoy ocasiona el vertimiento de estas excretas a la superficie del terreno las cuales a pesar de los causantes reconocidos por la comunidad ,estos pueden estar contaminando el agua subterránea.
2. Se recomienda además del tratamiento de este residual aprovechar el biogás y el biofertilizante.

## **Bibliografías**

- Alonso-Estrada, D., Lorenzo-Acosta, Y., Díaz-Capdesuñer, Y. M., Sosa-Cáceres, R., y Angulo-Zamora, Y. (2014). Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 48(3), 16-21.
- Arrastía, M. (2009). Hacia un nuevo paradigma energético [on line]. Recuperado de: <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2009-01-13/hacia-unnuevo-paradigma-energetico/v>
- Barrera Cardoso, E. (2006). Propuesta tecnológica para producir biogás con fines energéticos, un estudio de caso en la Granja Remberto Abad Alemán. (Tesis de Maestría). Universidad de Cienfuegos
- Borroto, N. A. (2006). La gestión energética y la competitividad empresarial. Centro de Estudios de energía y Medio Ambiente. Cuba: Universidad de Cienfuegos.
- Caraballo, M. E. (2006). Diseño y construcción del biodigestor atípico del ISMM. (Trabajo de Diploma de Ingeniería Mecánica). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Carrillo, L. (2004). Energía de la biomasa, Conversión por microorganismos, Biogás, Etanol, Biodiesel. s.l: s.e
- Comas Rodríguez, R., Nogueira Rivera, D., Sosa Ibarra, T. I., y Chaviano Lorenzo, N. (2011). Propuesta de un indicador general de gestión energética para la Empresa de Cigarrillos "Juan D. Mata Reyes". Observatorio de la Economía y la Sociedad Latinoamericana, 157.
- Consejería Económica, Innovación y Ciencia. (2011). Estudio Básico del Biogás. Agencia Andaluza de Energía.
- Domínguez, P. (2009). Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados. La Habana: Instituto de Investigaciones Porcinas.

- Espinosa, M. (2013). Tratamiento del Centro Porcino Comunidad “Las Terrazas” con aprovechamiento del biogás y abono orgánico (Biofertilizante). En XI Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica y VII Seminario Internacional del Uso Integral del Agua. La Habana.
- Fernández Castillo, E. (2003). Estudio de las Condiciones de Operación para la Digestión Anaerobia de residuos Sólidos Urbanos. Colombia: Universidad de Santander.
- Field, J. (2013). Medición de Metano del Biogás. Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda. [www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866c.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866c.pdf).
- Granada, E. V., Artunduaga, W., y Gordillo, L. A. (2009). Recuperación parcial del concentrado de la porquinaza, una alternativa ambiental y económica. Ingeniería y Región, (6), 53-60.
- Guardado, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas: CUBASOLAR.
- León Segovia, M. A. (2013). Dinámica de la gestión energética en el campus Matriz de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Período 2012-2013. Propuesta de un sistema de gestión total del uso eficiente de energía eléctrica (Tesis de Maestría) Universidad Técnica de Cotopaxi: Dirección de Posgrados: Ecuador.
- Mediacejas Granda, I. (2011). Propuesta de un biodigestor a partir de una caracterización energética de la Unidad Básica de Producción Cooperativa “Rolando Lores Cuesta”. (Tesis de Maestría en Eficiencia Energética). Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Monterroso, C. J. (2011). Estudio de los efluentes del procesamiento de pota en Piura y su potencial uso como fertilizante (Tesis de Diploma en opción al Título de Ingeniero Industrial y de Sistemas). Universidad de Piura
- Montalvo, S., y Guerrero, L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de Biogás. Universidad Técnica Federico Santa María, 5-366.



- Ninabanda Agualongo, J. J. (2012). Alternativas de manejo de las excretas porcinas (Trabajo de diploma). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Organización Panamericana para la Salud. (1999). Manual para la elaboración de compost: Bases conceptuales y procedimientos (OPS/HEP/HES/URU/02.99).
- Regalado Yépez, D. A. (2009). Estudio de la generación de biogás y fertilizante orgánico utilizando desechos orgánicos (Tesis de Diploma) Quito: USFQ.
- Roche Salazar, H. (2014). Evaluación del potencial energético de la Biomasa residual de la industria forestal y agrícola en Moa (Tesis de Diploma). Departamento de Mecánica: Moa
- Torres Vásquez, K. M. (2013). Diagnóstico para mejorar la eficiencia energética en la escuela Politécnica del Ejército extensión Latacunga 2013. Elaboración de un sistema de gestión energética según la norma internacional ISO 50001 (Tesis de Maestría). Universidad Técnica de Cotopaxi: Ecuador.
- Terrero, O. (2012). Variante de la tecnología de fabricación de un biodigestor de mampostería y concreto para una granja porcina (Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico).
- Villacrés Jirón, M. A. (2016). Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado porcino para el aprovechamiento energético en la granja porcina García en el cantón La Maná barrio Miraflores sector El Toquillal en el año 2016. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito (Tesis de Maestría). Universidad Técnica de Cotopaxi: Ecuador.
- Villanueva, S. M. (2008). Proyecto de Biogás.

## ANEXOS



Anexo 1. Entrada



Anexo 2. Rancho.



Anexo 3. Propietario del porcino



Anexo 4. Diplomante Roisdel Hernández Castro



Anexo 5. Crías



Anexo 6. Cebas





Anexo 7. Residuos de excreta porcino



Anexo 8. Tubo por donde se vierte los residuos al medio ambiente