



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial
Centro de Estudio Energético y Tecnología Ambiental
Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de diploma

Título: Evaluación del potencial energético del biogás generado por el sector porcino en Placetas

Autor: Ernesto Jacinto Morffi.

– **Tutores: Dr. Víctor Ocaña Guevara**

– **Dr. Iosvani López Díaz**

Ing. Pedro Luis Reyes Morel

Santa Clara

2017

Dejémosle LUCES
en lugar de CAUDALES
la IGNORANCIA ES MAS DE TEMER
QUE LA POBREZA
Simón Bolívar

DEDICATORIA

A mi abuelo Morffi que fue mi héroe, mi mejor amigo, que fue la persona que en su memoria he intentado convertirme en el hombre que él siempre soñó., el hombre que ha sido mi guía en los momentos más cruciales de mi vida, a la persona que siempre llevo conmigo.

Se las dedico con el mayor amor del mundo a mi familia que siempre han estado hay para mí:

A mi abuela y a mi madre por aguantarme en los momentos buenos, malos y desagradables, y por nunca rendirse conmigo

A mis hermanas que adoro con la vida, sobre todo a Beatriz que es la mujer que más admiro.

A mi Papa por estar siempre a mi lado y por darme su apoyo

AGRADECIMIENTOS

A toda mis familiares que siempre ha estado ahí para mí en los momentos más cruciales sobre todo a mis tíos: Raúl, Vladimir, Niurka, Omar, Odenia y Alina.

A mí cuñado Jorge y a Mailer por estar dándome su apoyo cuando lo necesitaba.

A mis primos Isaac, Debbie, Fabián y Sol por estar siempre junto a mí.

A mis amigos Juan Carlos, Belkis, Gretter, Aimé, Arelis, Daniel, Leydis, Recio, Fanny, Silva, Lidia, Jorgito, Kirenia, Raulito, Pito, Ordoñez, Alexis, Orrantia, Irma, Yuliet, Amparo, Geyni, Carlitos, Tere, Yalaime, Clarita, a todos ellos por ser parte de mi vida.

A mis niñas Anaya, Anakarla y Steffani:

A todos mis compañeros del aula que compartir con ellos fue uno de los mejores momentos de mi vida

RESUMEN

El biogás es una mezcla constituida principalmente por metano la cual sirve como recurso energético, que teniendo en cuenta las diferentes tecnologías con las que se puede emplear esta puede ser de ayuda para el mejoramiento energético del país. La presente investigación consiste en realizar el diseño de un biodigestor termofílico a nivel industrial para la obtención de biogás a partir de la biomasa húmeda principalmente de excreta porcina en el municipio de Placetas. Mediante la búsqueda bibliográfica se selecciona el tipo de biodigestor óptimo a partir del análisis de los diferentes parámetros a tener en cuenta para la selección de un correcto funcionamiento y su mantenimiento adecuado, asegurando así la mayor producción en la menor cantidad de tiempo posible.

ABSTRACT

The biogas is a mixture mainly made with methane, and it is an energetic resource, taking into account the different technologies in which the biogas could be used, it may be helpful for the improvement of the energy in our country. This paper is based on a presentation of the thermophilic biodigester to an industrial level, in order to obtain biogas. Through wet biomasses, mainly made by hog feces in Placetas municipality, by means of. The bibliographic research, we selected the right biodigester from the analysis of the different parameters to be concerned with the selection of its right functioning and maintenance, making it to insure the major production in a less period of time.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	6
1.1. Antecedentes del biogás como combustible alternativo	6
1.2. Biogás, generalidades	11
1.2.1. Digestión anaerobia.....	12
1.3. Parámetros ambientales y de control.....	12
1.3.1. EL pH.....	12
1.3.2. Temperatura	13
1.3.3. Tiempos de retención (TR)	14
1.3.4. Sustancias inhibidoras.....	15
1.3.5. Agitación.....	15
1.4. Tipos de procesos anaerobios para los residuos sólidos orgánicos	16
1.4.1. Procesos continuos y discontinuos.....	16
1.4.2. Procesos de vía húmeda y seca.....	17
1.5. Propiedades energéticas del biogás	18
1.6. El proceso de producción de biogás	18
1.7. Clasificación de las plantas de biogás	21
1.7.1. Digestores de primera generación.....	21
1.7.2. Digestores de segunda generación	22
1.7.3. Digestores de tercera generación.....	25
1.8. Factores que influyen en la obtención de la biomasa húmeda	26
1.9. Características de la biomasa porcina	28
1.10. Recolección de biomasa húmeda.....	29
1.11. Conclusiones parciales.....	29
CAPÍTULO II: CONDICIONES DE DISEÑO Y SELECCIÓN.....	30
2.1. Características del biodigestor.....	30
2.1.1. Ventajas y desventajas de los biodigestores	31
2.2. Condiciones de diseño y selección	32
2.2.1. Requerimientos.....	32
2.2.2. Localización del biodigestor	33
2.2.3. Lugar de construcción.....	33

2.2.4. Preparación del plano	34
2.2.5. Construcción- examen del suelo.....	34
2.2.6. Selección de acuerdo a la temperatura	34
2.3. Selección del modelo de biodigestor	37
2.3.1. En biodigestor de estructura sólida móvil	38
2.4. Calculo del Biodigestor	38
2.4.1. Dimensiones	41
2.5. Operación y mantenimiento	42
2.6. Balance térmico	43
2.7. Agitadores.....	45
2.8. Calculo de la pérdida desarrollada por la bomba.....	45
2.9. Determinantes socio-económicos de la demanda de biogás.....	46
2.10. Eficiencia del sistema	47
2.11. Recomendaciones para el sistema	47
2.12. Conclusiones parciales	48
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL BIODIGESTOR	49
3.1. Calculo del biodigestor.....	49
3.2. Análisis de los resultados.....	55
Conclusiones Generales	59
RECOMENDACIONES	60
Bibliografía	61
Anexos	65

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía global ha estado aumentando rápidamente debido a la explotación de combustibles fósiles, el crecimiento continuo de la población mundial y la economía industrializada. Las fuentes de energías desarrolladas por el hombre, que al cabo del paso del tiempo resultaron nocivas, insuficientes, caras, peligrosas, y las diversas formas de contaminación, han llevado al estudio e investigación de nuevas maneras de contrarrestar el incremento del deterioro del medio ambiente, basadas en la mejor utilización de los recursos naturales. (Carabeo, 2013)

Los combustibles fósiles que incluyen aceite crudo y sus derivados, carbón y gas natural, representan los recursos de energía más importantes a nivel mundial. La biomasa está abundantemente disponible en la Tierra y se considera el componente más común para la producción de energía renovable. La biomasa puede convertirse en varios tipos de biocombustibles o energía que utiliza varios procesos ya sea termal o procesos biológicos. La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. (Carabeo, 2013)

La energía de la biomasa deriva del material de vegetal y animal, tal como la madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animal. El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía, a menudo en forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta; esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es la inversa de la fotosíntesis. (Contreras, 2013)

La biomasa se descompone a sus moléculas elementales por la liberación de calor. Por lo que, la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales, pero en una tasa más rápida. Por lo tanto, la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. Utilizar esta energía no añade dióxido de carbono al medio ambiente, en contraste con los combustibles fósiles. Además, es la

única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. (Blanco, 2012)

Las valoraciones de energía de recursos de la biomasa pueden ser consideradas como una estrategia de desarrollo para la mejora de la calidad de vida y el ambiente. Los residuos de la biomasa anualmente asequibles son varios, dependiendo de las condiciones locales; de los factores climáticos, de la producción de la granja, el tipo y variedad de ganado y de las cosechas que plantaron y sus rendimientos. Una de las barreras importantes al desarrollo de la biomasa es la falta de conocimiento del recurso potencial, se necesitan estimaciones exactas de fuentes de biomasa para la toma de decisiones en los procesos.

No es concebible un desarrollo sostenible basado en fuentes de energía que contaminen el medio ambiente y provoquen el cambio climático con sus posibles consecuencias catastróficas y mucho menos se puede concebir un desarrollo sostenible basado en una dependencia energética. (Agencia de Energía, 2011)

En este sentido se buscan nuevas alternativas para el manejo de los residuos sólidos orgánicos, principalmente de aquellos que se generan por la ejecución de actividades porcinas, con el fin de aprovecharlas como fuentes de energía renovable que ayuden a minimizar los impactos ambientales. (Alfonso, 2011)

Es evidente que las decisiones de los seres humanos en lo que es el hábitat se ve afectado notoriamente. Cada día se ve como el clima presenta cambios drásticos y la necesidad de tomar acciones al respecto de manera responsable con la naturaleza. (Alfonso, 2011)

Precisamente una de estas alternativas es aprovechar la digestión anaerobia o biodigestión de los desechos orgánicos a través de los biodigestores, que en el sector porcino se aprovecha como materia prima el estiércol para la producción de biogás y biofertilizantes, minimizando la acumulación de la materia orgánica depositados en los suelos. (Alfonso, 2011)

Las familias dedicadas a esta forma de vida, tienen problemas con la acumulación del estiércol en las fincas y ranchos, lo cual repercute directamente en el ambiente y genera la proliferación de vectores que afectan al ganado y a la salud propia de las

personas, este problema radica en no saber darle una disposición final o tratamiento al estiércol que se genera en grandes cantidades.(Moreira., 2003)

Debido a la alta disponibilidad de biomasa húmeda asociada a la producción porcina, a las características de esta actividad económica, los diferentes métodos para la obtención de biogás a partir de la misma, los requerimientos de limpieza para el uso del biogás, las implicaciones económicas asociadas a la producción de biogás y a los balances energéticos asociados resulta pertinente tener claridad en relación a la tecnología a proponer, la cual debe brindar una eficiencia optima y la capacidad de ser autosustentable.

Atendiendo a todo lo anterior se plantea el siguiente **problema de investigación:**

Qué tipo de biodigestor resulta óptimo para la producción de energía atendiendo a la eficiencia y autosustentabilidad para el municipio de Placetas.

Objetivo general:

Desarrollar la modelación energética de digestores de gran volumen para el tratamiento centralizado de residuos de la cría de ganado, en especial el porcino y la producción de energía.

Objetivos específicos:

1. Realizar un estudio bibliográfico de los factores que influyen sobre la disponibilidad y el aprovechamiento de la biomasa húmeda resultante de la producción porcina con fines energéticos.
2. Determinar el tipo de biodigestor a emplear de acuerdo con la temperatura, tiempos de retención, modelo y carga.
3. Analizar si el biodigestor propuesto es eficiente y autosustentable.

Método de investigación:

El método utilizado es la investigación documental por el gran contenido de consultas bibliográficas que se pretende realizar para poder establecer un conjunto de premisas básicas imprescindibles para la obtención de biogás. Es importante destacar que una investigación documental es un proceso sistemático de indagación, organización, búsqueda, selección, lectura, análisis e interpretación de información, extraídas de

fuentes documentales existentes acerca de un problema, la misma se basa en una estrategia de análisis de documentación con el fin de encontrar una solución a interrogantes planteadas.

Preguntas de investigación:

1. ¿Qué fundamentos teóricos sustentan el proceso de producción de biogás?
2. ¿Cuáles son los factores que influyen en la obtención de la biomasa húmeda?
3. ¿Qué resultados se obtienen a partir del análisis de dichos casos?

Principal resultado a obtener:

Determinación de un biodigestor que además de ser eficiente sea también autosustentable.

En base a la revisión de bibliografía actualizada, el objetivo de la investigación y el problema científico puede plantear lo siguiente:

Hipótesis:

Si se realiza un balance térmico y energético de la disponibilidad de biomasa del municipio de Placetas, se puede determinar el biodigestor más pertinente de acuerdo a eficiencia y autosustentabilidad.

Justificación:

Con esta investigación se contribuye a ampliar el horizonte cognoscitivo acerca de la utilización de biogás en la obtención de energía, el cual servirá como guía y material de apoyo para estudiantes, tecnólogos, ingenieros y profesionales de cualquier ámbito en la provincia de Villa Clara y Cuba. Los resultados de esta investigación brindan a la comunidad científica-técnica una herramienta importante para el desarrollo de su trabajo.

Viabilidad de la Investigación:

La investigación es viable ya que cuenta con profesionales capacitados y la experiencia necesaria acerca del tema, pertenecientes a la Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas”, además de poseer la información y herramientas computacionales para realizar esta investigación.

La tesis se **estructura** de la siguiente manera: introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

En el **Capítulo I** se establece el marco teórico de la investigación en el cual se hace un estudio bibliográfico acerca de los diferentes métodos de obtención de biogás, los factores que influyen sobre estos y qué hacer.

En el **Capítulo II** establece los métodos de investigación a emplear y los cálculos definidos para determinar el dimensionamiento y el tipo de biodigestor.

En el **Capítulo III** muestra los cálculos necesarios mediante balances térmicos y energéticos para determinar la sustentabilidad del biodigestor.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta investigación, la bibliografía, y los anexos que contienen tablas, gráficos, figuras, instrumentos utilizados en las técnicas aplicadas y otros documentos que permiten complementar la lectura de la investigación realizada.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes del biogás como combustible alternativo

La crisis petrolera de los años 70 condujo al final de una era marcada por el combustible abundante y de bajo costo. Desde entonces, muchos se desarrollaron y los países en vías de desarrollo comenzaron a buscar fuentes alternativas de búsqueda que crece más fuerte cada año. (Agencia de Energía, 2011)

Las primeras menciones sobre biogás y los biodigestores se remontan al año 1600 identificados por varios científicos como un gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica. Las primeras personas que descubrieron el tipo de gas inflamable generado por la descomposición de los materiales orgánicos fueron Van Helmont (1630) y Shirley (1667). Más adelante; Volta (1766) descubrió el gas de los pantanos y a través de los estudios y observaciones, concluyó que las cantidades de gases generados dependen estrictamente en la cantidad de plantas podridas en el fondo. Hasta el 1804-1810, Dalton, Henry y Davy expresaron la fórmula química de metano y demostraron que la naturaleza de gas de los pantanos en el experimento de Volta es idéntica al gas en las minas de carbón. El primer equipo de biogás se construyó en Bombay, India, en 1859. Estuvo dirigido al tratamiento de estiércol humano y el gas producido se utilizó para la iluminación, y ya en 1896 en Exeter, Inglaterra, el alumbrado público era producido por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad. Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico, debido al estudio de los microorganismos en los laboratorios, que permitió conocer cómo actúan en condiciones anaeróbicas. (Pedroso, 2015)

A finales de 1920, los estudios químicos sobre la descomposición anaerobia se incrementan, Buswell investigó el papel de los elementos químicos en el proceso de fermentación anaerobia, la evolución del proceso de generación de biogás desde residuos de las granjas y su aplicación a escala industrial. Hoy, el proceso de descomposición anaerobia de los materiales orgánicos se desarrolla como un sistema multipropósito cuyas finalidades son:

1. Tratar los residuos orgánicos y agua residual con gran cantidad de contenido orgánico y amplia concentración de elementos químicos.
2. Producir biogás y su uso como combustible.
3. Mejorar las condiciones higiénicas del medio.
4. Producir fertilizantes de alta calidad.

Las investigaciones evolucionan desde estudios básicos del proceso de descomposición de los materiales orgánicos semejantes al contener elementos orgánicos sólidos (5% -10%) hasta la fermentación de materiales más complejos que necesitan tanques de descomposición modernos y más efectivos. (Pedroso, 2015)

El avance de esta técnica ha permitido que importantes ciudades del mundo, como es el caso de Santiago de Chile en América Latina, incluyan un importante porcentaje de gas procedente de esta fuente en la red de distribución urbana de gas natural. (Aczia, 2011)

Junto con la generación de energía renovable almacenable, la producción distribuida de biogás puede ayudar no solamente a desarrollar las regiones rurales sino también a fortalecer a empresas pequeñas y medianas. Gracias al marco legal positivo para las fuentes de energía renovables que ha existido en Alemania desde el año 2000, la producción y utilización del biogás se ha expandido rápidamente en los años recientes. En 2010 existían ya más de 5900 plantas de biogás, la mayoría de las cuales se operan en medios agrícolas. Durante el mismo periodo, también ha habido importantes cambios y mejoras en las tecnologías utilizadas. La riqueza de la experiencia de Alemania en tecnología del biogás encuentra ahora una demanda internacional creciente. (Aczia, 2011)

Es considerado una fuente de energía renovable que es diseñado para complementar la mezcla de energía brasileña y global. El interés en la mejora de su producción se da por la mezcla de su naturaleza obligatoria y los incentivos del gobierno. Los tales incentivos son basados en las ventajas traídas por el biogás para el desarrollo de la agricultura familiar y contribución para la seguridad de energía nacional. Como una consecuencia, la producción de biogás e investigaciones en el uso de otras biomásas va creciendo significativamente a nivel mundial. (Aczia, 2011)

Debido a la gran población y su rápida economía China tiende a volverse en un gran consumidor de energía del primer mundo. Como un precio neto el importador de aceite, gas y carbón, hay gran interés en China en desarrollar la producción de la biomasa como una fuente de energía doméstica. El uso de moderno de la biomasa también ayudaría a China alcanzar el recientemente el blanco anunciado a la gorra su rápidamente las emisiones del carbono crecientes por 2030.(Aczia, 2011)

En un esfuerzo por bajar la confianza de la Unión Europea (UE) en las fuentes de energía fósiles y para mitigar el cambio del clima, se han introducido varias fuentes de energía renovables para que se comercialicen durante las últimas décadas. La biomasa representa uno de las fuentes potenciales más grandes de UE de energía renovable en el consumo de energía total, para que en el 2020 llevar a un aumento a largo plazo en la demanda de la biomasa europea. (Blanco, 2012)

Hoy en día, el calor del biogás se utiliza en el secado de grano, la calefacción de agua para los animales en las propiedades del condominio e incluso en la refrigeración de productos perecederos. La aplicación automotriz, que se encuentra en fase de investigación, podría haber dirigido su uso para el suministro de vehículos y maquinaria agrícola por filtración y adaptación adecuada del biogás. A nivel industrial el uso de biodigestores está ampliamente extendido. (Blanco, 2012)

La tecnología del biogás se incrementa en muchos países, tanto desarrollados como en vías para ello. China y la India están a la vanguardia en su aplicación. En el primero hay más de 8 millones de obras a escala familiar y 2500 de gran dimensión que suministran el gas para más de 50 millones de personas equivalentes a más de 3 000 millones de m³ de gas. La tecnología de biogás para producir electricidad también tiene determinado éxito con la producción de 866kW hasta el 2001. Además, China comercializa fertilizante del lodo de los estanques de descomposición (24900 t/año) y más de 700 t de alimentos subsidiados para el ganado.(Pedroso, 2015)

En la India hay más de 3 millones de obras funcionando que producen una cantidad de gas más o menos igual que China. Los sectores que aprovechan el biogás han obtenido ciertos éxitos junto a la cocción de los alimentos, la iluminación, la generación de electricidad y la calefacción. Las plantas utilizadas ampliamente en China y la India son de cubierta fija. Los equipos de cubierta flotante con junta y los equipos de alta

productividad se utilizan preferentemente para el tratamiento de aguas residuales, tanto del sector doméstico como el industrial. Nepal es otro país con un amplio programa de desarrollo. Hasta 2002, la cantidad de plantas instaladas eran de 54 000 en 64 distritos del país, con 50 empresas productoras de biogás. En Europa, los equipos construidos son de gran dimensión, que llegan a producir hasta miles de m³ de gas.(Pedroso, 2015)

Hasta el presente, existen 50 000 plantas de biogás en todo el país, entre ellos más de 20 000 son de bolsas de nylon, entre el resto, el equipamiento con tapa fija ocupa el 70% y el de tapa flotante de cemento un 30%. En el presente, el Departamento de Agricultura del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural trabaja con la Agencia de Desarrollo de Holanda (SNV) del Ministerio de Cooperación y Desarrollo de Holanda, en la ejecución de un proyecto de apoyo al programa de Biogás para el sector de ganadería en varias provincias de Vietnam con el financiamiento del Ministerio holandés. Dentro del proyecto, se construye 12000 equipamientos de biogás familiar en las zonas de Norte, Centro y Sur. En la segunda fase de proyecto, está programado a construir 180,000 obras más en todo el país. (Blanco, 2012)

En Cuba, a principios de los años 80, esta tecnología cobró gran auge entre las entidades productivas, sobre todo en vaquerías y centros porcinos. Luego, con el paso del tiempo, un elevado número de estos sistemas fueron desatendidos, hasta que dejaron de funcionar la mayoría de las plantas montadas. Esto se debió, principalmente, a los bajos precios de la corriente eléctrica en ese momento y a la poca motivación de las entidades hacia la utilización de las energías renovables. Hoy el escenario en Cuba es muy diferente, pero no menos complejo. Con la creciente entrega de tierras a pequeños propietarios y los elevados precios que ha alcanzado la energía en el país, la utilización del biogás se muestra como una alternativa interesante. Los nuevos propietarios están motivados y la demanda de digestores es muy alta, con tendencia al aumento. Esto, unido al incremento de las pequeñas y medianas producciones de cerdos, ha creado un ambiente favorable para el desarrollo del biogás. Sin embargo, la principal limitación es el alto costo y la carencia de materiales (cemento, áridos, ladrillos) para la construcción de las plantas de cúpula fija que tradicionalmente se han utilizado. Una posible estrategia para dar solución a este problema es el empleo de los digestores de materiales alternativos, más baratos y menos trabajosos en su montaje.

La tecnología de los digestores plásticos en la actualidad se muestra como una posible solución a la elevada demanda, siempre que las materias primas estén disponibles en el mercado y que se eliminen las indisciplinas tecnológicas, lo cual limita su extensión.(CUBA, 2009)

Uno de los procesos de investigación e innovación tecnológica que se desarrollan en el marco del proyecto internacional BIOMAS-CUBA está relacionado con la producción de biogás y bioabonos, a partir de los efluentes de biodigestores en el contexto de las fincas donde se produce alimentos y energía, de forma integrada.(CUBA, 2009)

En el país en el Plan de desarrollo económico hasta el 2030 propuesto en el VII CONGRESO DEL PCC se trazaron objetivos donde se hablan de los temas de la energía como:

- ✓ Transformar la Matriz energética con una mayor participación de las fuentes renovables y otros recursos nacionales.
- ✓ Recuperar, preservar, modernizar y ampliar la infraestructura energética como sustento del desarrollo previsto de la eficiencia energética.(Bérriz, 2016)

Donde se decidió como programa nacional:

- Ampliar este alcance, a través del incremento de la eficiencia energética de forma tal que el país pueda enfrentar la actual situación mundial por la falta de combustible fósil. (Orden ministerial OM-106 enero del 2016)
- Incrementar la participación de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) en la matriz energética de electricidad hasta un 24% en el año 2030 con avances establecidos en Cronograma por años (Acuerdo de la Asamblea Nacional 2015)(Satorre, 2016)

Ambas medidas son establecidas por la comisión gubernamental Nacional para el desarrollo de la energía con el fin de incrementar la independencia energética del país. Esto se debe a situaciones como:

- ❖ Alta dependencia de los combustibles fósiles importados, lo que representa un permanente riesgo para el país, desde el punto de vista económico y estratégico.

- ❖ Baja utilización de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) donde la producción nacional de electricidad con FRE es solo el 4.5% en el 2015 equivalente a solo 20 días del consumo de electricidad del país

No es concebible un desarrollo sostenible basado en fuentes de energía que contaminen el medio ambiente y provoquen el cambio climático con sus posibles consecuencias catastróficas y mucho menos se puede concebir un desarrollo sostenible basado en una dependencia energética.(Satorre, 2016)

La agricultura cubana se propone lograr el abastecimiento total de energía eléctrica en las unidades productoras utilizando fuentes renovables de energía, como el biogás. La FAO aseguró hoy que el biogás es una fuente de energía renovable que puede impulsar las actividades agropecuarias de los pequeños productores y reducir la emisión de gases de efectos invernadero en América Latina y El Caribe. El organismo de la ONU indicó que en los últimos años la energía y los biocombustibles ocupan un lugar prioritario en la agenda de la FAO.(Satorre, 2016)

Debido a la necesidad de desarrollo de la provincia y a la relación existente entre desarrollo y consumo energético resulta necesario garantizar la demanda de energía generada por el crecimiento de la economía local proyectada. Existen dos aspectos que pueden contribuir de manera decisiva en este propósito: en primer lugar, la eficiencia energética que actúa sobre el incremento de la demanda energética y segundo la utilización del potencial de portadores de energía renovable existente en la región. En Cuba existe experiencia en el uso del biogás. Una de las mayores plantas fue construida en 1991 en Turiguanó, Ciego de Ávila con una capacidad de 2 000 m³ diarios con el apoyo de la organización ecuménica alemana “Pan para el Mundo” (Satorre, 2016)

1.2. Biogás, generalidades

El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico). El productor resultante es una mezcla constituida por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 40% a un 70% y

dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). (Pedroso, 2014)

1.2.1. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica es la degradación biológica u oxidación del material orgánico, donde intervienen microorganismos específicos en ausencia de aire (oxígeno molecular). En este proceso el material a degradar se transforma en dos productos utilizables, el uno en un producto estable e inerte llamado biol y el otro en biogás con un alto contenido de metano, ambos productos de este proceso poseen cualidades energéticas. En la degradación anaerobia interactúan diferentes grupos microbianos, haciendo un proceso complejo, pero de manera coordinada y secuencial para la degradación de la materia orgánica (Satorre, 2016)

1.3. Parámetros ambientales y de control

Existen varios factores que pueden afectar, mejorando o inhibiendo, el funcionamiento del proceso de digestión anaerobia. Estos factores, que se describen a continuación, son el pH, la temperatura, los nutrientes, el potencial redox, el tiempo de retención y velocidad de carga orgánica, la agitación y las sustancias inhibidoras. (Pedroso, 2014)

1.3.1. EL pH

El valor del pH es un importante indicador del funcionamiento del proceso dentro del biodigestor. En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado (Tabla 1). El mayor problema generalmente es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano. La alcalinidad y el pH en la digestión anaerobia pueden ajustarse añadiendo a la mezcla diferentes productos químicos (bicarbonato de sodio y potasio, carbonato de calcio, etc.) y también mezclando diferentes residuos a tratar en el reactor [codigestión]. (Soler, 2009)

Tabla 1 Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos

Etapas	Tipo de bacterias	Rango óptimo pH
Hidrólisis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
Acidogénesis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
Acetogénesis	Acetogénicas y homoacetogénicas	7,0 – 7,2
Metanogénesis	Metanogénicas hidrogenófilas y acetoclásticas	6,5 – 7,5

1.3.2. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, principalmente las de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4° a 5° C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70°C. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo: (Energético, 2016)

- Psicrófilo: por debajo de 20 °C
- Mesófilo: entre 20 y 40 °C
- Termófilo: mas 40 °C

Los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislamiento y control, los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas.

La temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa,(Pedroso, 2014)

Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás. No obstante, y a pesar de que el rango termófilo sea el más idóneo para obtener una rápida velocidad del proceso y mayor eliminación de patógenos, suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Además, operar en el rango termófilo requiere un mayor control y seguimiento del proceso, así como un mayor gasto energético para mantener la alta temperatura, mientras que el funcionamiento en el rango mesófilico es más estable y requiere un menor consumo de energía. (Producción animal, 2000)

1.3.3. Tiempos de retención (TR)

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o batch” donde el TR coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor (Díaz de Basurto, 2013)

De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

El TR está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. (Díaz de Basurto, 2013)

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el TR, ya que varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia. (Producción animal, 2000)

El límite mínimo de los TR está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción

debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias (que pertenecen dentro del reactor). (Díaz de Basurto, 2013)

1.3.4. Sustancias inhibidoras

El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. El nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles son inhibidores importantes de las bacterias metanogénicas, así como los metales pesados a altas concentraciones. Este tipo de sustancias pueden encontrarse como componentes del sustrato de alimentación o como subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos del reactor.

La literatura referente al proceso de digestión anaeróbica, habla de la variación que existe en los niveles de inhibición/toxicidad reportados para la mayoría de sustancias. La mayor razón para que existan estas variaciones es la complejidad del proceso de digestión anaerobia donde los mecanismos como el antagonismo, sinergismo y aclimatación pueden afectar significativamente a la inhibición. (Díaz de Basurto, 2013)

1.3.5. Agitación

Las siguientes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión son:

- ✓ Mezclado y homogeneizado del sustrato de alimentación con el inóculo.
- ✓ Distribución uniforme de calor para mantener una isoterma suficientemente correcta.
- ✓ Evitar la formación de espumas o la sedimentación.
- ✓ Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato

Diferentes métodos de agitación son la recirculación de materia digerida, agitación mecánica y la inyección del gas producido. La materia digerida se recircula desde el centro del reactor y tras mezclarse con el sustrato nuevo y calentarse se introduce de nuevo en el reactor. La agitación mecánica se lleva a cabo con turbinas de baja velocidad para no destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable. Finalmente, el método de inyección de biogás es exitoso

para lograr la agitación del contenido del reactor y para evitar la formación de costras (Blanco, 2012)

1.4. Tipos de procesos anaerobios para los residuos sólidos orgánicos

Los sistemas de digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos suelen diferenciarse en:

- El tipo de carga del sustrato: continuo (una o varias etapas) o discontinuo
- La concentración de sólidos del sustrato (vía húmeda o seca)
- El tipo de reactor: de mezcla completa o de flujo pistón
- La agitación
- La recirculación del efluente (Soler, 2009)

1.4.1. Procesos continuos y discontinuos

Se utilizan generalmente dos tipos de procesos para ejecutar la digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos: los continuos y los discontinuos. En los sistemas discontinuos, los reactores se llenan una vez con sustrato y se cierran durante todo el tiempo de retención para finalmente abrirse y vaciarse el efluente del reactor. En los sistemas continuos, en cambio, el sustrato se introduce continuamente en el reactor, saliendo de este la misma cantidad introducida. (Blanco, 2012)

Los reactores discontinuos son útiles porque pueden fomentar una rápida digestión con un equipo barato y simple, y también porque en ellos se puede evaluar la velocidad de digestión. Sin embargo, estos sistemas también tienen alguna limitación, como una gran fluctuación tanto en la producción de gas como en su calidad y la pérdida de gas en el vaciado del reactor. Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad, deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo. Como se ha visto anteriormente, la biometanización de los residuos sólidos orgánicos se lleva a cabo gracias a una serie de procesos biológicos, que pueden separarse básicamente en una primera etapa en la que sucede la hidrólisis y la acidificación, y una segunda en la que el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono se transforman en metano. Teniendo en cuenta estos procesos, los sistemas

continuos pueden dividirse en sistemas de una etapa o de dos (o más) etapas. En los sistemas de una etapa, todos los procesos biológicos se realizan simultáneamente en un único reactor. El mayor inconveniente de este tipo de sistemas es que todos los procesos trabajan bajo las mismas condiciones de operación a pesar de que las bacterias involucradas en dichos procesos tengan tasas de crecimiento y valores óptimos de pH diferentes. Esa es la razón por la que los sistemas de una etapa fallan más que las de dos o más etapas, ya que, como se ha comentado anteriormente, un desequilibrio entre las tasas de producción de ácido y de metano puede causar un descenso del pH con el consiguiente fallo del biodigestor. Los sistemas de dos o más etapas permiten que los procesos biológicos se lleven a cabo secuencialmente en al menos dos reactores. (Blanco, 2012)

Los sistemas típicos consisten en un primer reactor en donde se lleva a cabo la hidrólisis y la acidificación, y un segundo reactor en donde sucede la metanogénesis gracias al producto obtenido del primer reactor. Una de las ventajas de estos sistemas es que son capaces de obtener una producción de metano y una reducción de sólidos similar a los sistemas de una etapa con un tiempo de retención hidráulico menor. Además de que muchos de los tóxicos son eliminados en la primera etapa. (Blanco, 2012)

Sin embargo, según la mayor ventaja de estos sistemas es la mejor estabilidad biológica que proporciona cuando se tratan residuos que causan un funcionamiento inestable en los sistemas de una etapa. Entre los inconvenientes, cabe destacar que son más caros de construir y mantener. (Blanco, 2012)

1.4.2. Procesos de vía húmeda y seca

Los procesos de digestión anaerobia pueden considerarse vía húmeda o seca dependiendo de la concentración de sólidos en el residuo de alimentación. Los sistemas húmedos son aquellos en los que el valor de los sólidos totales (ST) es un 16 % o menos, mientras que los sistemas secos tienen entre 22 y 40 % de ST, considerándose los que se encuentran entre ambos valores de sistemas semisecos. En los procesos de digestión húmeda, el residuo sólido debe ser condicionado a una apropiada concentración de sólidos añadiendo agua al proceso o recirculando una parte

del efluente líquido, o mediante la codigestión con otro residuo líquido. La aplicación de estos sistemas tiene diversas ventajas como la dilución de sustancias inhibidoras debido al agua utilizada en el proceso y el requerimiento de equipos mecánicos menos sofisticados. También tiene desventajas como el complicado pretratamiento y el elevado consumo de agua y energía para el calentamiento (Yılmaz and Selim, 2013)

1.5. Propiedades energéticas del biogás

Las propiedades del biogás se deben a la presencia del gas metano como combustible principal y del hidrógeno en proporción al contenido de estos. “La combustión es muy limpia dando como productos finales bióxido de carbono y agua que no son contaminantes; por esta razón se dice que el biogás es un combustible ecológico. El poder calorífico del biogás está comprendido entre 4 500 y 6000 kcal/m³ dependiendo de su composición”. El biogás tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5 500 kcal/Nm³.

1.6. El proceso de producción de biogás

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos. El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica. En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. El requerimiento de calidad del biogás para quemadores es bajo. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H₂S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C. Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera.(Rodríguez, 2014)

Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del

proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor. Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, > 100 kW) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S (bajo 100 ppm) y vapor de agua. Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones. El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible. (Rodríguez, 2014)

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión. Por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido. Sin embargo, su difusión está limitada por una serie de problemas

- A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión
- La conversión de los motores es costosa (instalación similar a la del gas natural) y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.
- Por último, la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de uso. (Hilbert, 2015)

El diseño de una planta de biogás dependerá de la cantidad y del tipo de residuos disponibles en el medio rural, de las condiciones de clima, necesidades de biogás que se requiere, ubicación, materiales y técnicas de construcción de que se disponga en cada sitio. Con el objeto de minimizar los costos de la planta, ésta deberá ser adecuada a cada necesidad, construida hasta donde sea posible con materiales y mano de obra

locales. Antes de proceder al diseño de una planta de biogás para el medio rural, es necesario estimar el potencial de producción de biogás, para definir su factibilidad considerando la forma de manejo del ganado y por lo tanto cual es la cantidad mínima de residuos que permita producir el biogás requerido para cubrir las necesidades planteadas.(Pedroso, 2015)

El diseño y dimensionamiento de un biodigestor depende, en lo fundamental, de los factores siguientes:

Tipo y composición del material orgánico que se debe emplear para la biodigestión.

- ✓ Demanda de biogás y de biofertilizantes.
- ✓ Materiales de construcción que se deben emplear.
- ✓ Tecnologías constructivas apropiadas.
- ✓ Facilidad de explotación y mantenimiento.
- ✓ Posibilidad económica del usuario.

Estos factores pueden ser resumidos en dos:

- ✓ Factibilidad de la inversión (necesidad y condiciones creadas).
- ✓ Características y situación económica del usuario.

El empleo de los biodigestores en el manejo de las excretas de ganado, no sólo contribuye a la disminución de las emisiones de metano a la atmósfera, sino también presenta otras ventajas adicionales que contribuyen de manera positiva en el medio ambiente, entre estos beneficios tenemos:

- ✓ Reducción de las emisiones de N_2O derivadas del uso de fertilizantes químicos aportadores de nitrógeno.
- ✓ Producción de biofertilizantes ricos en nitrógeno, fósforo y potasio capaz de competir con los fertilizantes químicos que son más caros y afectan el medio ambiente.
- ✓ Mejoras de la calidad de vida [reducción de la carga de trabajo por la colección y acarreo de leña].

- ✓ Mejora de la calidad del aire en cocinas y hogares. Reducción de efectos sobre la salud en la familia al no exponerse a los gases tóxicos de la combustión de la leña. Mejora en la limpieza de utensilios de cocina.
- ✓ Mejora de las condiciones sanitarias del área, reducción de malos olores en la diseminación de parásitos y bacterias.
- ✓ Elimina las excretas de los animales que contaminan el medio ambiente. Reducción de la contaminación de suelos y aire.(Betancourt, 2012)

1.7. Clasificación de las plantas de biogás

Se clasifican, según la forma de recolección de gas, en tapa flotante, tapa fija y de balón



Figura 1: Clasificación de los principales tipos de biodigestores

1.7.1. Digestores de primera generación

Como se ha comentado antes, en los reactores de primera generación, el tiempo de retención hidráulico es igual al tiempo de retención de sólidos. Veamos una descripción de los principales digestores de esta primera generación.

Tanques sépticos:

Se trata de un foso revestido de cemento, ladrillo, etc., que se construye enterrado y consta de uno o dos compartimentos al que se descargan las aguas negras de origen doméstico. Tras ellos el efluente líquido se distribuye por un campo de filtración. (Contreras, 2013)

Pequeños biodigestores:

Las plantas constan de un pequeño digestor enterrado, con conexiones de entrada y salida para la materia a digerir y una tubería en la parte superior para la salida y recolección del gas. De acuerdo con su diseño, pueden agruparse en tres categorías:

- 1) Con cúpula fija
- 2) De campana flotante
- 3) De planta balón

Lagunas anaerobias:

Las lagunas anaerobias son las más pequeñas dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización y corresponden a la primera fase de estos sistemas. Por lo general tienen una profundidad 2.00 y 5.00 metros.

Las lagunas anaeróbicas funcionan de modo similar a los tanques sépticos abiertos y trabajan en forma Óptima en los climas calientes, tropicales y subtropicales, dado que la intensidad del brillo solar y la temperatura ambiente son factores clave para la eficiencia en los procesos de degradación y estabilización.

1.7.2. Digestores de segunda generación

Los reactores de segunda generación se basan en tres aspectos fundamentales:

1. Acumulación dentro del reactor de la biomasa por sedimentación, unión a partículas sólidas (fijas o móviles) o recirculación. Tales sistemas permiten retener a microorganismos que crecen muy lentamente, asegurando que el tiempo de retención de sólidos sea mucho mayor que el tiempo de retención hidráulico.
2. Mejora del contacto entre la biomasa y el agua residual, solucionando los problemas de difusión de substratos o productos.

3. Mejora de la actividad de la biomasa mediante adaptación y crecimiento.

Veamos ahora una breve descripción de los sistemas de segunda generación más extendidos:

De lecho expandido:

Este tipo de reactor es una estructura cilíndrica, empaquetada hasta un 10% del volumen del reactor con un soporte inerte de pequeño tamaño lo que permite la acumulación de elevadas concentraciones de biomasa que forman películas alrededor de dichas partículas. La expansión del lecho tiene lugar gracias al flujo vertical generado por un elevado grado de recirculación. La velocidad ascensional es tal que el lecho se expande hasta un punto en el que la fuerza gravitacional de descenso es igual a la de fricción por arrastre. (Contreras, 2013)

UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket):

Este tipo de digester fue desarrollado en 1971 en Holanda. Han sido utilizados ampliamente en Europa y en Latino América. Estos digestores operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el afluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno, entrando en contacto con la cama de lodo anaeróbico. Cada ramal tiene aperturas a través de las cuales fluye el afluente. Estos recorren todo el fondo del reactor.

Cuando el gránulo libera el biogás adherido a su superficie, el lodo vuelve a caer a la zona inferior del reactor, el biogás es colectado en las cámaras para tal fin, y el agua residual tratada abandona el reactor por rebose. Esta dinámica ocurre continuamente dentro del reactor. El biogás generado da lugar a una agitación interior que interviene en la formación y mantenimiento de los gránulos, removiendo la cama de lodos y permitiendo el intercambio de estos con el agua residual. El elemento en donde se separan biogás, agua residual tratada y lodo es llamado separador trifásico. Este consta de varias cámaras separadas por deflectores, en las que el gas es recolectado.

La innovación técnica de este tipo de reactores reside en un dispositivo situado en la parte superior del reactor (separador trifásico mencionado anteriormente) que permite acumular grandes cantidades de biomasa muy activa que adopta la estructura de gránulos compactos con una elevada capacidad de sedimentación. El problema

principal de este tipo de digestores es la correcta simulación y estudio de los mecanismos que rigen la aglomeración de los microorganismos, ya que son los causantes de la desaglomeración, provocando que la planta no trabaje adecuadamente.

De dos etapas:

Estos sistemas consisten en un primer reactor con un elevado tiempo de retención en el que se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos durante la primera etapa. Si la primera etapa corresponde a un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percloración en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda.

Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Esta especialmente indicado para procesos de digestión en los que la etapa limitante sea la hidrólisis.

CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor):

Fueron desarrollados para la estabilización de lodos de aguas residuales urbanas y sucesiva mente aplicados para tratar estiércoles y otros vertidos agrícolas o agro-industriales con alto porcentaje de sólidos totales, con el fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato en cuestión. Son reactores relativamente sencillos pero en los que tenemos que prestar mucha atención al complejo sistema de mezclado, por agitadores, durante su construcción y mantenimiento. Al estar la materia orgánica a digerir completamente mezclada, presentan unos tiempos de retención hidráulica en torno a los 10-35 días.

La principal desventaja de estos digestores la constituyen las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados y los relativamente altos tiempos de retención hidráulica requeridos. Suelen ser contruidos con hormigón armado, acero o acero esmaltado, lo que les permite trabajar tanto en rango mesófilico como en termófilico. Los cambiadores de calor pueden ser internos o externos, siendo los primeros más fáciles de mantener pero precisan de una bomba extra para la recirculación de lodos. Los segundos son más utilizados a pequeña escala.

Poseen un elevado rendimiento de producción de metano, hecho que les sitúa como los más extendidos en plantas de producción de biogás en Europa.

1.7.3. Digestores de tercera generación

Están basados en modificaciones del UASB para permitir aumentar la velocidad de carga orgánica y/o su aplicabilidad. Los dos más destacados son el EGSB (expanded granular sludge bed) y el IC (internal circulation). Veamos sus principales características operativas. (Contreras, 2013)

Reactor IC (Internal Circulation):

El concepto del IC está basado en la tecnología del UASB, con dos etapas de separadores trifásicos. Estos son de una mayor relación entre altura y diámetro. En efecto, el IC consiste en dos compartimentos tipo UASB colocados uno sobre el otro (el inferior es altamente cargado, mientras que el superior es poco cargado de materia orgánica).

En el IC el afluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno, donde el lodo recirculado y parte del efluente son mezclados para lograr la dilución directa y acondicionamiento del afluente. La primera etapa contiene un manto concentrado y expandido de lodo granular, donde la mayor parte es convertida en biogás. Esto provoca la expansión/fluidización de la cama de lodo que es elevada por la velocidad ascendente producto de la mezcla del afluente, recirculación interna y flujo de biogás. El contacto efectivo que se realiza entre el agua residual y la biomasa produce un lodo muy activo, que como consecuencia tiene la capacidad de tratar altas cargas orgánicas con altas tasas de conversión. El biogás producido en esta primera etapa es atrapado en los colectores de gas inferiores y es empleado para promover el ascenso del agua residual tratada y el lodo a través la tubería ascendente hacia el tanque desgasificador en el tope del reactor. Aquí, el biogás es finalmente separado y enviado al sistema de manejo de gas.

La mezcla de agua tratada y lodo baja directamente al fondo del reactor por la tubería descendente. Esto resulta en la recirculación interna. Mientras mayor sea alimentado el reactor, mayor será la recirculación interna, por lo que la materia biodegradable en el fondo del reactor se mantiene prácticamente constante. El efluente de la primera etapa

es pulido en la segunda. El biogás producido en la segunda etapa es atrapado por los colectores superiores, mientras que el efluente tratado abandona el reactor por rebose. Mediante la remoción del biogás generado en la primera etapa, la turbulencia es minimizada en la segunda etapa. De esta forma se logra una eficiente separación de los gránulos de lodo en el colector de gas del tope del reactor.

Reactor EGSB [Expanded Granular Sludge Bed]:

El reactor EGSB nace de una serie de modificaciones realizadas a los reactores UASB con el fin de mejorar el contacto entre el afluente a tratar y la biomasa. Para ello se utilizan velocidades ascensoriales de 4 a 10 m/h, a diferencia del reactor UASB, en el cual no se suele sobrepasar la velocidad de 1 m/h. De esta forma se obtiene un lecho expandido agitado, a diferencia con el caso del reactor UASB, donde es principalmente estático, favoreciendo la capacidad para generar agregados de bacterias de alta densidad.

Este aumento de velocidad ascensorial se consigue mediante una fuerte recirculación, junto con una relación altura/diámetro más elevada que en los reactores UASB. La operación con elevadas relaciones de recirculación permite que estos sistemas sean adecuados para tratar compuestos inhibitorios, pero biodegradables, dado que se produce un efecto dilutorio a la entrada del reactor de manera que las concentraciones de los compuestos tóxicos sean lo suficientemente bajos para que no causen problemas a la biomasa.

1.8. Factores que influyen en la obtención de la biomasa húmeda

El biogás es un recurso con el cual la población cubana puede ayudar al sustento energético del país. En la actualidad muchos campesinos e instituciones no aprovechan al máximo este recurso utilizándolo principalmente para cocción de alimentos, desconociendo todas las oportunidades que este medio ofrece y es nuestro deber ayudar a la explotación de la información de todo lo que nos puede ofrecer el biogás. (Blanco, 2012)

Tres son los límites que podemos encontrar a la hora de implementar un digestor de estas características: la disponibilidad de agua para diluir el estiércol que se alimenta el

digestor, la disponibilidad de acumular el estiércol fresco diariamente y la apropiación de la tecnología por parte de los destinatarios.(Pedroso, 2015)

Al ser una energía renovable procedente de la biomasa hace que esta tecnología provea de forma autosuficiente y autónoma de independencia energética a las comunidades que la implementan.

Invertir en generación de biogás es altamente rentable, por varios motivos:

1. El costo de instalación por MW es sustancialmente inferior al de otras energías renovables.
2. La producción en horas/año es muy superior, puesto que no se dependen de fenómenos climáticos o atmosféricos, una planta de biogás puede estar funcionando 24 horas al día durante un año.
3. Las tarifas para este tipo de energía están subvencionadas durante 15 años. Los fondos propios invertidos se recuperan en 5 años y la vida útil de las plantas está establecida en 25 años, aunque puede prolongarse durante mucho más tiempo.
4. Las plantas de biogás son gestionadas durante toda su vida útil para maximizar su producción
5. Incluso el residuo del proceso de digestión es un abono de primera calidad susceptible de ser vendido en el mercado.

Una planta de Biogás es una industria en sí misma, atrás quedó el concepto de industria auxiliar o complementaria. En la actualidad la rentabilidad supera con creces a la de muchas inversiones tradicionales. Por eso es importante trabajar con una empresa con experiencia previa, no solo en la construcción de plantas, sino en la gestión integral de estos. Un proceso que perdurará durante toda la vida útil de la planta.

El tamaño de las instalaciones es un indicador primario de si la recuperación de biogás será económicamente factible. Las instalaciones grandes generalmente producen suficientes residuos, de manera continua, para mantener un proyecto de biogás. Dichas fincas tienen rendimientos de biogás predecibles y disponibles para utilizar como energía, en cualquier época. Aunque debe anotarse que el criterio de tamaño no es

absoluto, algunas fincas pequeñas también pueden realizar exitosamente proyectos de recuperación de biogás.(Energia, 2011)

1.9. Características de la biomasa porcina

El estiércol fresco es la mejor materia prima utilizada para la producción de biogás. Además, se pueden usar cualquier otro tipo residuos orgánicos, evitando residuos duros (cascaras duras) o de larga duración de descomposición. El estiércol con mayor capacidad de generación de biogás es el porcino y las excretas humanas, pero el fertilizante que producen es muy ácido, además por animal se produce gran cantidad de estiércol, y por tanto es el más fácil de recoger.(Bérriz)

La biomasa porcina no es un abono de composición fija. Esta depende de la edad de los animales de que se procede, de la alimentación a que están sometidos, trabajo que realizan, aptitud, naturaleza y composición de camas, etc. Un animal joven consume mayor cantidad de nitrógeno y fósforo que un animal viejo; las deyecciones que de aquel proceden contienen, pues, menor cantidad de esos elementos. Los animales viejos habiendo cesado de crecer, asimilan los alimentos únicamente las cantidades necesarias para cubrir las pérdidas y dan estiércoles más ricos en elementos fertilizantes. (Bérriz)

Las diversas especies animales producen excremento de composición química diferente. Resulta que los orines del ganado abundan en nitrógeno (N) y, sobre todo en potasio (K), y en cambio apenas contienen ácido fosfórico, que se encuentra todo en las deyecciones sólidas. (Bérriz)

En la composición de la biomasa húmeda influye también la composición de las raciones alimentarias. Cuantas más ricas son estas en un determinado elemento, mayor es la cantidad que de ese elemento se encuentra en los excrementos. Las camas que se juntan con el estiércol, también influencia según su composición y cantidad. (Fachagentur, 2010)

Previo a su utilización, el estiércol debe someterse a un proceso de fermentación para que los nutrientes que contiene en forma no asimilable, se tornen en asimilables para las plantas, y se origine los compuestos húmicos, que desempeñan función esencial en el suelo utilizado para cultivos. (Fachagentur, 2010)

La fermentación del estiércol debe ser lenta, para dar tiempo a que el amoníaco que se forma pueda ser absorbido y, al mismo tiempo, para evitar consumo excesivo de materia orgánica, como sucede cuando la fermentación es rápida. (Fachagentur, 2010)

1.10. Recolección de biomasa húmeda

Quizás la primera interrogante a resolver al proyectar una instalación de generación de biogás es determinar si se cuenta con biomasa en la cantidad y frecuencia suficiente para proveer la carga orgánica necesaria y mantener de manera continua la operación del biodigestor (Carabeo, 2013)

Una vez establecida la disponibilidad de biomasa esta debe ser colectada en alguna parte del sistema de generación de biogás, con el propósito de adecuarla (diluirla o concentrarla, adicionarle nutrientes) o simplemente conducirla al biodigestor. (Contreras, 2013)

El sistema de colección esta predeterminado por un inventario de la cantidad de desechos orgánicos a emplear, características de los mismos (biodegradabilidad), estado físico en que se manejan (líquido o sólido), frecuencia de recolección de la biomasa, transporte al biodigestor, de la calidad de esta información básica depende el éxito del sistema. (Carabeo, 2013)

1.11. Conclusiones parciales

1. De la literatura consultada se puede afirmar que el biogás es una opción real que tiene altas ventajas competitivas respecto a otros energéticos, en cuanto a la preservación del medio ambiente, resulta económicamente factible y rentable, además no pone en riesgo las reservas de los hidrocarburos.
2. De los biodigestores analizados se pretende trabajar con biodigestores de nivel industrial de segunda generación.
3. En Cuba no se ha trabajado con biodigestores a gran escala pues los intentos que se han hecho no han dado resultados.

CAPÍTULO II: CONDICIONES DE DISEÑO Y SELECCIÓN

En este capítulo se recogen los puntos básicos que deben considerarse para realizar el correcto diseño de un digestor, partiendo del análisis de los múltiples parámetros, los cuales determinan dicho dimensionamiento.

2.1. Características del biodigestor

El digestor es el componente del sistema de biogás que optimiza naturalmente el crecimiento y proliferación de un grupo de bacterias anaerobias que descomponen y tratan los residuos dejando como subproducto gas combustible y un efluente líquido rico en nutrientes y materia orgánica estabilizada. Basados en limitaciones externas como inversión, eficiencia del tratamiento, rendimiento de la energía neta y rendimiento de las operaciones, el rango de las tecnologías disponibles varía desde los sistemas muy rudimentarios hasta los más sofisticados tanto a escala doméstica como a escala comercial. La elección de cual digestor utilizar, está condicionada inicialmente por la temperatura y las características del sistema de manejo de residuos existente o que se planea instalar el cual determina el método de carga del digestor. (Contreras, 2013)

El no cargar un digestor por una semana puede conducir a una pérdida en la producción de biogás. Más importante aún es que el cargar el digestor en intervalos irregulares puede interrumpir el proceso biológico y causar que el sistema trabaje ineficientemente o hasta detenerlo completamente. Por lo tanto, muchos digestores son diseñados para ser cargados diariamente. Con cargas continuas y descargas de material del sistema, las bacterias trabajan eficientemente y se procesan grandes cantidades de residuos.(ICONTEC, 2013)

La recolección diaria de residuos es también eficiente en términos de conservar los valores de nutrientes del residuo y preservar su potencial producción de gas. Cualquier descomposición de material orgánico fuera del digestor reducirá la producción de biogás, por lo tanto, es mejor cargar residuos frescos al digestor. Si no se recolectan diariamente residuos, debe considerarse la opción de convertirse a esta práctica. (Satorre, 2014)

El sistema de conducción de gas remueve el biogás desde el digestor y lo transporta hacia su uso final. Este sistema puede incluir: tubería, bomba de gas o turbina, medidor de gas, regulador de presión y evacuadores del condensado, en caso de ser requeridos. Sus dimensiones dependen de lo siguiente:

- a) Del flujo de gas que se desea transportar
- b) De la distancia existente entre la planta y el lugar de uso.

Estas dos variables se utilizan para fijar el diámetro de tubería adecuada a los deseos del consumidor y a las características del diseño. Las plantas de Biogás utilizan casi siempre manguera o tubería de polietileno, PVC 6, debido a que estos materiales no son afectados por la acción del ácido sulfhídrico. La línea de conducción de gas irá preferiblemente enterrada o recubierta para evitar el deterioro(cristalización) por la luz solar (ICONTEC, 2013)

A continuación se presentaran las condiciones fundamentales a tener en cuenta para la selección preliminar del sistema de producción de biogás.

2.1.1. Ventajas y desventajas de los biodigestores

Ventajas.

- ✓ Ayuda a controlar la excesiva acumulación de estiércol en las zonas ganaderas.
- ✓ Ayuda a satisfacer la demanda de alumbrado, gas para cocinar, producción de energía eléctrica, etc.
- ✓ Generación de fertilizantes naturales ricos en nutrientes, para cultivos de los campesinos.
- ✓ Ayudan a controlar y minimizar la contaminación ambiental, sin aportar al calentamiento global.
- ✓ La disminución de olores del estiércol en los ranchos.
- ✓ Controla la proliferación de vectores que generan los excrementos y que causan enfermedades en el ganado. (Ni et al., 1993)

Desventajas.

- ✓ Debe evitarse cambios bruscos de temperatura, manteniéndola constante y cercana a los 35 °C.

- ✓ Se puede generar ácido sulfhídrico, lo que resulta corrosivo para el biodigestor.
- ✓ Si no se tiene un monitoreo constante de la presión interior, puede explotar o generar fugas de gas.
- ✓ El tiempo de durabilidad depende del tipo de biodigestor a construir. (Ni et al., 1993)

2.2. Condiciones de diseño y selección

En general, la selección de tipo de planta depende de la condición natural, tipo de material, necesidad y capacidad de usuario. (Borja and Rincón, 2017)

2.2.1. Requerimientos

Los principales requerimientos para un buen diseño de estos sistemas incluyen:

- a) El diseño debe ser simple tanto para la construcción como para la operación y mantenimiento.
- b) Materiales: Se deben utilizar materiales que estén disponibles localmente. Se debe emplear un tipo de material resistente a la corrosión, con propiedades de aislamiento efectivas.
- c) Duración: La construcción de una planta de biogás requiere cierto grado de práctica. Una planta de corta vida podría ser económicamente rentable, pero puede no ser reconstruida una vez su vida útil termine. Sería necesario construir plantas más durables, pero esto puede aumentar los costos en la inversión inicial.
- d) Se deben implementar dispositivos de seguridad
- e) Utilizar el mínimo de equipo mecánico y eléctrico
- f) Implementar control ambiental en la disposición y uso del efluente
- g) Un sistema de producción de biogás ideal debe ser de bajo costo tanto como sea posible [en términos del costo de producción por unidad de volumen de biogás].

Particularmente y dependiendo de la escala del sistema para el diseño se tendrá en cuenta:

- a) Recepción apropiada de residuos e instalaciones de carga

- b) Digestor, tanque de carga, dispositivos de mezcla, almacenamiento de biogás, tanque de descarga y calderas para proveer calor al digestor.
- c) Equipo de transporte que puede incluir tubería, válvulas, descarga de calor, tubería para remover el agua condensada
- d) Utilización del biogás: Equipos de combustión y/o de generación eléctrica (Borzacconi et al., 1995)

2.2.2. Localización del biodigestor

La localización para la construcción de un digestor de biogás es, sin duda, uno de los puntos críticos de la obra, y determina, en gran medida, el éxito de la tecnología. Una ubicación ideal es aquella que se encuentra cerca de donde se generan los residuales, a un nivel inferior del punto de desagüe de las instalaciones. Esto garantiza que el acopio de los residuos sea sin gasto de energía ni la intervención directa del hombre. La inclusión de esta tarea dentro de las labores de los obreros, lejos de una solución, puede tornarse un problema para el sistema productivo, ya que se tiende a priorizar otras acciones con la consecuente desatención del digestor. (Borja and Rincón, 2017)

2.2.3. Lugar de construcción

Para un funcionamiento adecuado, largo aprovechamiento, y facilitar la construcción, debemos:

- 1) Garantizar la superficie del plano para la construcción de la planta con las dimensiones diseñadas, asegurando el ahorro de superficie de plano y la no afectación de las obras a su alrededor
- 2) Debe de estar lejos de zonas bajas, lagos y pantanos para evitar la acumulación de agua y asegurar la durabilidad de la obra
- 3) Evitar las zonas de suelo débil pues se complica el tratamiento de la base
- 4) Evitar construcción cerca de árboles grandes cuyas raíces puedan dañar la obra
- 5) Se ubicará cerca del lugar consumo de gas para ahorrar tubos y evitar posibles escapes de gas en casos de rotura
- 6) Estará cerca de contenedor de residuo líquido para el uso como fertilizante
- 7) El equipo se debe instalar en lugar con sol, poco aire para mantener la temperatura alta y crear las condiciones favorables para la fermentación

- 8) Se sitúa lejos de los depósitos de agua potable (10 m como mínimo), obras subterráneas como cables y tubos (Carabeo, 2013)

2.2.4. Preparación del plano

1. Allanar el terreno, ver el desagüe y despojar de plantas el plano
2. Planificar el lugar adecuado para concentrar la tierra y los materiales de construcción
3. Análisis de suelo, determinar la dimensión de la excavación y forma de excavar. El tanque de descomposición se construye primero
4. La ubicación de los componentes del plano se determina con el centro del digestor: desde este centro se calcula la circunferencia del tanque en el plano para excavar. Si el suelo es débil, deben abrir esta circunferencia (Energía, 2011)

2.2.5. Construcción- examen del suelo

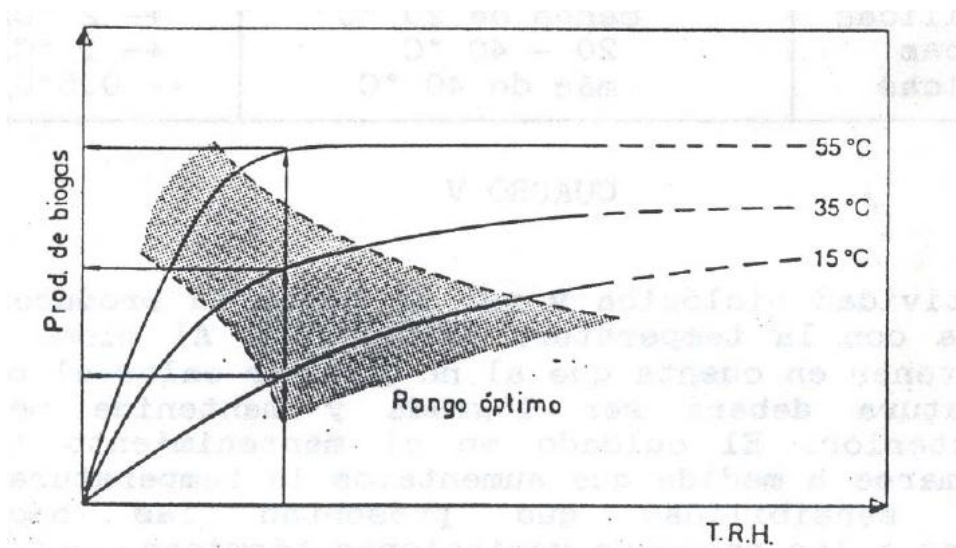
Es necesario realizar un análisis previo o estudiar los documentos sobre la condición geográfica del lugar para proyectar adecuadamente la estructura, construcción, preparación de materiales y diseño apropiado de la planta. Las evaluaciones incluyen:

1. Tipo de suelo, la similitud entre las capas de tierra y la necesidad de realizar análisis después de terminar la excavación para un resultado más exacto.
2. Determinar el nivel de agua subterráneo, lo cual define la profundidad del equipo: construir cunetas a los alrededores. (Carabeo, 2013)

2.2.6. Selección de acuerdo a la temperatura

La actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura. Al mismo tiempo se deberá tener en cuenta que al no generar calor en el proceso la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. El cuidado en el mantenimiento también debe extremarse a medida que aumentamos la temperatura, dada la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas. Todas estas consideraciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor

ya que a pesar de incrementarse la eficiencia y producción de gas paralelamente aumentará los costos de instalación y la complejidad de la misma. (Aczia, 2011)



Como vemos en esta grafica la producción de biogás está estrechamente relacionada con la temperatura y el tiempo de retención por lo cual se intentara escoger la mayor temperatura para así asegurar un máximo aprovechamiento de la materia prima en el menor tiempo posible (Aczia, 2011)

La digestión anaerobia que se realiza a digestión mesofílica, reduce el número de posibles larvas y huevos de algunos gusanos y parásitos a niveles que no se detectan luego de una semana, sin embargo generalmente existe poco control de Ascaris, Tenias y Cryptosporidium. Aunque, el oocyst [un tipo de huevo] de los gusanos el cual puede infectar a cualquier animal si lo ingiere, permanece luego de 50 días a 35°C. La digestión a 55°C (a digestión termofílicas) reduce significativamente la cantidad de oocyst, así como los diferentes tipos de bacterias y parásitos. La digestión mesofílica no reducirá significativamente el potencial de infección de residuos contaminados por parásitos. También una temperatura termofílica trae consigo una disminución en el volumen del biodigestor, lo que trae gran beneficio para los biodigestores a nivel industrial. (Aczia, 2011)

Luego de analizar los parámetros anteriores se define como propuesta un biodigestor termofílico.

Tabla 2 Valores y características del estiércol de algunos animales

Clase de animal	% por peso vivo		% del material de digestión		Relación C/N	P - Producción de biogás (m ³ de gas / 1 kg SO)
	PE - Estiércol	PO - Orina	% EST Sólidos	% SO Sólidos orgánicos		
Vacunos	5	4	15-16	13	20	0.250
Porcino	2	3	16	12	13	0.350
Caprinos, ovinos	3	1.5	30	20	30	0.200
Equinos	5	4	25	15	20	0.250
Avícolas	4.5	4.5	25	17	5-8	0.400
Humanos	1	2	20	15	8	0.300

2.3. Selección del modelo de biodigestor

A la hora de seleccionar el biodigestor, se deben tener en cuenta sus características Ver tabla 3.

Tabla 3 Resumen de características de algunos tipos de biodigestores

Características	De estructura sólida	De estructura sólida móvil	De balón de plástico
Cámara de digestión	Esférica / bajo tierra	Esférica/Semiesférica	Semiesférica
Nivel de tecnología	Madura	Madura	Madura
Presión del gas	No constante	Constante	Muy baja presión de gas, es necesario aumentar la presión con sobrepeso
Localización óptima	Todos los climas	Todos los climas	Todos los climas
Vida útil	20 años	20 años	5 años
Ventajas*	1-Bajos costos de construcción. 2-No posee partes móviles. 3-No tiene partes expuestas, por eso está protegido contra bajas temperaturas	1-Manejo fácil 2-El gas almacenado es visible a través del nivel de la campana	1-Bajos costos de construcción. 2-Fácil transporte e instalación. 3-Construcción horizontal y plana que favorece en los lugares con alto nivel freático
Desventajas*	1-La presión puede ser muy alta, por eso la cúpula tiene que ser cuidadosamente sellada; porosidades y grietas pueden afectar la planta.	1-Alto costo de construcción de la campana 2-Generalmente la campana es metálica y por eso sujeta a corrosión. 3-Más costos de mantenimiento (pintura).	1-El material plástico está sujeto a daños y tiene que ser protegido

Se puede apreciar que para seleccionar un biodigestor a escala industrial se descartan los modelos de balón de plásticos (y sus versiones) por el bajo tiempo de vida útil, se necesita un biodigestor que asegure la mayor cantidad de tiempo de vida posible.

2.3.1. En biodigestor de estructura sólida móvil

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. Para aumentar la retención de la materia prima, posee un tabique central. En este caso, los materiales usados son preferentemente excretas, las que deben estar bien diluidas y mezcladas homogéneamente. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0.5 y 1,0 volumen de gas por volumen de digestor por día (Moreno, 2011)

En biodigestor de estructura sólida fija:

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo del digestor, aumenta su presión forzando al líquido, en los tubos de entrada y salida a subir y llegándose a alcanzar presiones de hasta 100 cm de columna de agua. Se generan entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores. (Moreno, 2011)

Se selecciona un biodigestor de estructura sólida fija o modelo hindú.

2.4. Calculo del Biodigestor

Estiércol

$$E = NA * PVP * \frac{PE}{100}$$

donde,

E = Estiércol en kilogramos por día

NA = Número de animales por una especie (vacas, cerdos, caballos, humanos, etc.)

PVP = Peso vivo promedio por animal

PE = Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo.

Orine

$$O = NA * PVP * \frac{PO}{100}$$

donde,

O = Orine día en kilogramos (se asume que 1 litro de orín pesa 1 kilogramo)

NA = Número de animales por una especie

PVP = Peso vivo promedio por animal

PO = Producción de orín por animal por día en porcentaje de peso vivo.

Materia Prima Para Carga

$$MPC = E + O$$

donde:

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.

E = Estiércol en kilogramos por día

O = Orine en kilogramos por día.

Sólidos Totales

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC}$$

donde:

%ST = Porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.

%EST = Porcentaje de sólidos en el estiércol.

E = Estiércol en kilogramos por día

Sólidos Totales

$$ST = \frac{\%ST \cdot MPC}{100}$$

donde:

ST = Cantidad de sólidos contenidos en la materia prima para carga, en kilogramos por día.

%ST = Porcentaje de sólidos en la carga o materia prima

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.

Masa De Agua Para Mezcla

$$MH_2O = \frac{MPC \cdot ST}{10} - MPC$$

MH_2O = Masa de agua para mezcla que disminuye los sólidos orgánicos contenidos en la materia prima, en kilogramos por día.

ST = Cantidad de sólidos orgánicos contenidos en la materia prima para carga, en kilogramos por día.

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día

Carga

$$C = MPC + MH_2O$$

donde:

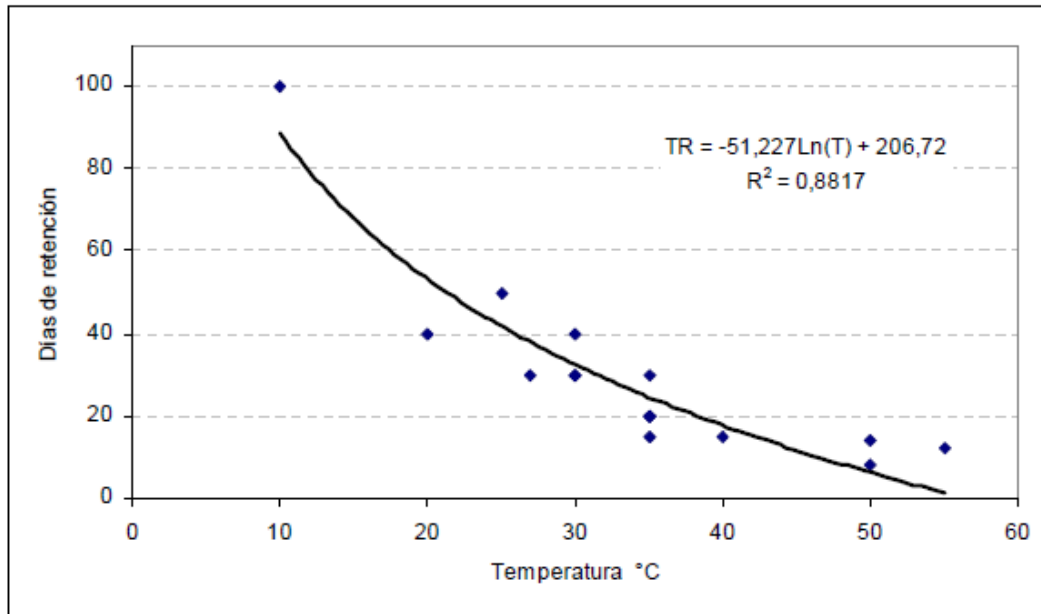
C = carga diaria para alimentar el digestor en kilogramos por día o litros por día (sea asume que un litro pesa un kilogramo).

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.

MH_2O = Masa de agua para mezcla que disminuye sólidos orgánicos contenidos en la materia prima, en kilogramos por día.

Cálculo del tiempo de retención (TR)

El posible tamaño del digestor (volumen del digestor) es determinado por el tiempo de retención (TR) y por la carga diaria. Se recomienda escoger el TR apropiado de acuerdo a la temperatura promedio del sitio en el cual va a operar, utilizando la relación generada en la



Grafica 1 Tiempo de retención en función de la temperatura

$$TR = (-51.227 * \ln(T^{\circ}\text{C}) + 206.72)$$

TR= Tiempo de retención en días

Ln.= Logaritmo natural

T°C= Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor

2.4.1. Dimensiones

El tamaño de la planta depende de la cantidad de material de entrada diaria y el tiempo de retención del mismo en el digestor, este último lo define la temperatura de cada zona. Al multiplicar la cantidad de material de entrada diario con el tiempo de retención tendremos el volumen de fermentación para seleccionar.

Volumen Del Digestor

$$Vd = C * TR * 1.2$$

Donde,

Vd. = Volumen del digestor, en litros

C = Carga diaria para alimentar el digestor en litros por día

TR = Tiempo de retención en días.

1,2 = Volumen adicional para el almacenamiento del biogás

Cálculo de la posible producción de biogás

$$PG = MPC * SO * P$$

donde:

PG = Gas producido en m³ por día

MPC = Estiércol en kilogramos por día

SO = Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie.

P = Producción aproximada de m³ de gas/1 kg de masa orgánica seca total

Para el cálculo del volumen de biogás recolectado en el día, se considera el tipo de material y la condición climática de la zona. (Moreno, 2011)

2.5. Operación y mantenimiento

El manejo es la clave para el éxito de un sistema de biogás. Muchos sistemas han fallado porque los operadores no tienen soporte técnico, tiempo, conocimiento o el interés requerido para mantener el sistema operando. El propietario debe saber que un digestor requiere regular atención, y algo de tiempo. El manejo adecuado requiere lo siguiente: (Moreno, 2011)

- 1) Soporte Técnico. Existen componentes claves del sistema con los cuales el propietario/operador debe familiarizarse. El fabricante o distribuidor debe enseñar al propietario la operación y el mantenimiento del sistema de biogás con los

estándares básicos en aspectos de ingeniería sobre la utilización del equipo, con un conocimiento completo sobre los aspectos de seguridad industrial, para que estén preparados para reconocer los problemas y como resolverlos. Es importante recomendar que existirán casos en los que deba requerirse el soporte técnico competente del fabricante o distribuidor.

- 2) Mantenimiento. Los conocimientos generales incluyen reparación de motores, mantenimiento y revisión, reparación y control de problemas y averías, tuberías y soldadura. Adicionalmente, el servicio y reparación de partes deben ser accesibles. Estos servicios los ofrecen muchas veces los fabricantes o distribuidores de equipos. El acceso a estos servicios es una consideración importante cuando se toma la decisión de adquirir el sistema.
- 3) Tiempo. El sistema requiere un tiempo de dedicación. El mantenimiento y monitoreo diario de un sistema toma aproximadamente 15 a 30 minutos. Adicionalmente, también se requiere tiempo para una eventual reparación o para mantenimiento preventivo.
- 4) El propietario debe aceptar el sistema como de su propiedad y querer operarlo. Los propietarios deben entender cómo funciona la tecnología y estar comprometidos a que el sistema sea exitoso. Los sistemas donde el manejo se deja como labor temporal de la finca o a terceras partes fallan por falta de motivación e incentivos. (Moreno, 2011))

2.6. Balance térmico

Para conocer un balance térmico es necesario ver los aportes y pérdidas de calor presentes en el equipo. Por lo que se debe conocer que:

Pérdida de calor por las paredes

g = aceleración gravitacional, m^2/s

T_s = temperatura de la superficie, $^{\circ}C$

T_{∞} = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^{\circ}C$

L = longitud característica de la configuración geométrica, m

ν = viscosidad cinemática del fluido, m^2/s

Se considera una placa caliente con su cara posterior aislada. Debe determinarse la razón de la transferencia de calor por convección natural para diferentes orientaciones. (Cengel)

El número de Rayleigh es el producto de los números de Grashof y de Prandtl; que es el producto del número de Grashof, que describe la relación entre flotabilidad y viscosidad dentro del fluido, y el número de Prandtl, que describe la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica. Por lo tanto, el número de Rayleigh por sí mismo puede considerarse como la razón de las fuerzas de flotabilidad y (los productos de) las difusividades térmica y de cantidad de movimiento. (Cengel)

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\nu^2} P_r$$

Entonces se puede determinar el número de Nusselt de la convección natural. El número de Nusselt representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. Entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/P_r)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

Luego se procede a calcular **h** en donde:

A_s es el área de la superficie de transferencia de calor

h es el coeficiente promedio de transferencia de calor sobre la superficie.

$$h = \frac{k}{L} * Nu$$

$$A_s = L^2$$

Teniendo ya calculados todos los valores necesarios se procede a calcular el calor rechazado (Cengel)

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Para diferentes temperaturas es necesario buscar el calor que genera el biodigestor por lo que se calcula teniendo la ecuación termodinámica del calor:

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Es importante controlar la temperatura en el biodigestor para facilitar la generación de biogás, se debe aportar calor necesario para el substrato ingresado cada día, por lo que llega a la siguiente expresión:

$$Q_{sum} = Q_{dig} + Q_R$$

2.7. Agitadores

Existen diversos tipos de agitadores, siendo los utilizados en el presente proyecto los de tipo mecánico y eje inclinado por recomendación de la empresa Wolf System. Su funcionamiento será continuo para evitar el desgaste y aumento de consumo que se da en los motores de los agitadores en cada arranque parada. (Silva Vinasco, 2016).

La velocidad de agitación es un parámetro de vital importancia, ya que una excesiva agitación podría incluso disminuir la producción de biogás por ruptura de agregados bacterianos.

Los agitadores mecánicos son suministrados por la empresa Wolf System, cada digestor constará de dos agitadores inclinados situados en los laterales del mismo con una potencia estimada por agitador de 15Kwh con un régimen de giro de 75rpm. El motor del agitador se instalara exteriormente, el eje y alabes de la hélice serán de acero inoxidable para evitar la corrosión y su deterioro. (Silva Vinasco, 2016).

2.8. Calculo de la pérdida desarrollada por la bomba

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + H_z + h_s$$

H: es la altura de presión total desarrollada por la bomba, en metros de la columna del líquido que se impulsa.

p_2 y p_1 : Las presiones en los espacios de impulsión y de aspiración; Pa

ρ : la densidad del líquido que se bombea; kg/m^3

H_z : La altura geométrica de elevación del líquido, m

h_s : La altura de presión necesaria para crear la velocidad y para superar el rozamiento y todas las resistencias locales en las líneas de succión y de impulsión, m

$g = 9.81m/s^2$, la aceleración de la caída

Calculo de la potencia de la bomba

$$N = \frac{Q\rho gH}{1000\eta}$$

Q: es el caudal volumétrico (capacidad de la bomba m^3/s)

ρ : la densidad del líquido que se bombea; kg/m^3

$g = 9.81m/s^2$, la aceleración de la caída

H: es la altura de presión total desarrollada por la bomba, en metros de la columna del líquido que se impulsa.

η : Rendimiento total de la instalación de bombeo que es el producto del rendimiento de la bomba η_b , del rendimiento de la transmisión η_{tr} y del rendimiento del motor η_m ,

$$\eta = \eta_b + \eta_{tr} + \eta_m$$

2.9. Determinantes socio-económicos de la demanda de biogás

El análisis a nivel microeconómico que se ha descripto no dará respuesta a preguntas de orden macroeconómico surgentes de una aplicación a mayor escala, dado que intervienen en la misma prioridad que en la asignación de recursos provenientes de fondos públicos, efectos sobre la balanza de pagos, etc. Además mucho de los factores que determinarán el grado de aceptación de la nueva tecnología como facilidad de crédito y el servicio de asistencia técnica, formarán parte de una planificada política general. (Suárez Lastre)

La localización y enfoque de la investigación requerirá también de una macro visión de esta tecnología.

A pesar que son previsibles cambios tecnológicos de importancia en biogás en los próximos años (particularmente reducción de los costos de inversión inicial y aumento de la confiabilidad) es posible y necesario definir y describir las zonas, regiones o sectores desde el punto de vista social, económico y físico donde esta tecnología pueda tener éxito (o donde sea mínima la posibilidad de fracaso).

El resultado de estos estudios y la prevalencia de las zonas donde sea factible la tecnología propuesta darán una señal más clara para determinar la importancia del biogás en el desarrollo agropecuario y energético del país y su ubicación dentro de las políticas energéticas y de fertilización (Suárez Lastre)

2.10. Eficiencia del sistema

Existe alta probabilidad de obtener rendimientos adecuados donde:

- Haya una seguridad de suministro constante en tipo y calidad de sustrato fermentable. Variaciones en el material a digerir complican el funcionamiento de los reactores.
- Se disponga de asistencia técnica para las etapas de diseño, puesta en marcha y mantenimiento del digestor.
- La temperatura ambiente no sea baja. Zonas de menor temperatura obligan a recurrir a sistemas de calefacción y aislación de un mayor costo, y dejan disponible una menor cantidad de energía.
- Se logre un adecuado diseño del digestor, lo cual permitirá un mejor manejo, un ahorro de tiempo de operación y un aumento en la confiabilidad.
- Se disponga de un adecuado servicio de mantenimiento. (Contreras, 2013)

2.11. Recomendaciones para el sistema

Para asegurar un rendimiento óptimo del digestor deben considerarse los siguientes aspectos:

- a) Nivel de amoníaco. Para un correcto funcionamiento, los niveles de amoníaco dentro de los digestores deben mantenerse por debajo de los 2000 mg/litro.
- b) Mantenimiento del pH en el digestor. Esto significa que la carga de fermentación no debe ser ni alcalina ni ácida. Si la carga del digestor es demasiado alta, el

valor del pH disminuye. Se debe agregar correctores de pH, para aumentarlo se adiciona cal y para disminuirlo se adiciona ácido.

- c) En caso de cambiar el tipo de materia prima que se utiliza para la carga, se debe redimensionar el biodigestor para adaptarlo a las nuevas condiciones.
- d) No introducir en el digestor fertilizantes fosfatados. Las condiciones de ausencia de aire producen compuestos de fósforo altamente tóxicos.
- e) No hacer llama en sitios cercanos.
- f) No usar el gas inmediatamente después de retirar el efluente del tanque de almacenamiento del digestor. Al realizar esta operación de descarga puede producirse eventualmente un efecto de presión negativa que puede tener las siguientes consecuencias: Devolver la llama al digestor, provocando una explosión o Introducir aire al digestor, lo cual sería nocivo para el proceso. Por ello se recomienda compensar el sistema alimentando al digestor una cantidad igual (carga diaria) al volumen de efluente retirado del tanque. Efectuada esta operación se deja transcurrir un tiempo prudencial (no más de ½ hora) para que se restablezca la presión positiva antes de usar el gas.
- g) Como una buena práctica, para un esquema de cualquier tamaño se necesitará tener en cuenta que se hará cuando el digestor alcance el final de su vida útil. (Pérez Medel, 2010).

2.12. Conclusiones parciales

1. Los principales parámetros para el diseño del biodigestor son: temperatura, tiempo de retención, dimensionamiento y modelo.
2. Para lograr una adecuada eficiencia es importante la selección del agitador, la bomba y los quemadores de forma tal el biodigestor funcione correctamente, de igual forma es necesario garantizar un adecuado mantenimiento que proporcione un aumento de la vida útil del biodigestor.

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL BIODIGESTOR

En este capítulo se propone la selección y el diseño de un biodigestor general para los agricultores porcinos del municipio de Placetas considerando una población porcina de 30 000 puercos, que generarían una biomasa húmeda que sería la materia prima a utilizar en este biodigestor. Con la construcción del biodigestor industrial se garantiza la producción de biogás y biofertilizantes para el municipio de Placetas.

3.1. Cálculo del biodigestor

Para realizar el cálculo de la generación de estiércol que se produce diariamente, se toma en cuenta la especie y la cantidad de animales (30 000 cabezas de puercos), adicionalmente de la Tabla 2 se toma Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo (2), se evalúa el peso vivo promedio por animal (45 kg) y se procede a efectuar la operación:

$$E = NA * PVP * \frac{PE}{100}$$

$$E = 30\,000 * 45 * \frac{2}{100}$$

$$E = 27\,000 \text{ kg/día}$$

De la misma forma se procede a calcular el orine seleccionando de la tabla 2 la producción de orine por animal por día en porcentaje de peso vivo.

$$O = NA * PVP * \frac{PO}{100}$$

$$O = 30\,000 * 45 * \frac{3}{100}$$

$$O = 40\,500 \text{ kg/día}$$

La materia prima para carga hace referencia a la cantidad de excremento y orine que está en condiciones de ser usada en su totalidad, a su vez que se encuentre puro y sin residuos de tierra u otro material no degradable, de esta manera materia prima usada es aquella producida por 30 000 cabezas de ganado porcino:

$$MPC = E + O$$

$$MPC = 27\,000\text{ kg/día} + 40\,500\text{ kg/día}$$

$$MPC = 67\,500\text{ kg/día}$$

Se calcula el porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga seleccionando en la tabla 2 el porcentaje de sólidos en el estiércol del animal seleccionado.

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC}$$

$$\%ST = \frac{27\,000 * 0.16}{67\,500}$$

$$\%ST = 6.4\%$$

Se procede a calcular el contenido de sólidos totales presentes en el estiércol, oríne o material orgánico que se alimenta al biodigestor, se expresa en porcentaje o peso de sólidos secos.

$$ST = \frac{\%ST * MPC}{100}$$

$$ST = \frac{0.064 * 67\,500}{100}$$

$$ST = 43.2\text{ kg/día}$$

Se calcula la cantidad de agua necesaria para mezclar la materia prima con el fin de obtener la carga diaria al digestor:

$$MH_2O = \frac{MPC * ST}{10} - MPC$$

$$MH_2O = \frac{67\,500 * 43.2}{10} - 67\,500$$

$$MH_2O = 224\,100\text{ kg/día}$$

Se busca la entrada de carga diaria al biodigestor habiendo obtenido los valores de la materia prima y la cantidad de agua necesaria:

$$C = MPC + MH_2O$$

$$C = 67\,500 + 224\,100$$

$$C = 291\,600L/día$$

El tiempo de retención es el lapso (en días) durante el cual la carga alimentada permanece en el digestor y es el tiempo necesario para la digestión del material orgánico a la temperatura de operación del digestor. Se toma una temperatura promedio de 50°C manteniendo un régimen termofílico asegurando así un tiempo de retención y un volumen de digestión, no tan elevados.

$$TR = (-51.227 * \ln(T^{\circ}C) + 206.72)$$

$$TR = (-51.227 * \ln(50) + 206.72)$$

$$TR = (-51.227 * 3.5 + 206.72)$$

$$TR = (-179.3 + 206.72)$$

$$TR = 6\,días$$

Luego de haber obtenido los valores necesarios e imprescindibles como la carga necesaria y el tiempo de retención se procede al cálculo del dimensionamiento del digestor incluyéndole un volumen adicional para el almacenamiento del biogás

$$Vd = C * TR * 1.2$$

$$Vd = 291\,600 * 6 * 1.2$$

$$Vd = 2\,099\,520\,L$$

$$Vd = 2\,100\,m^3$$

Refiriéndose al potencial de producción de biogás es el volumen de gas teóricamente obtenible de una materia prima, en función de la producción específica y de la cantidad disponible de materia orgánica seca.

$$PG = MPC * SO * P$$

$$PG = 67\,500 * 0.12 * 0.350$$

$$PG = 2835\,m^3/día$$

Ya habiendo obtenido el valor del volumen del biodigestor y la producción de biogás es evidente que no se habla de un pequeño biodigestor, por su capacidad de producción se está hablando de un biodigestor a escala industrial, ahora es necesario conocer cuanta energía consume dicho biodigestor, estos cálculos se realizan partiendo de los balances planteados en el epígrafe 2.6 y 2.8 del capítulo 2.

Antes de proceder a calcular se toman los valores, referidos a continuación de las propiedades del aire a la temperatura de película de $T_f = (T_s + T)/2 = (50 + 30)/2 = 40^\circ C$ y 1 atm son:

$$K = 0.02662\,W/m^\circ C$$

$$Pr = 0.7225$$

$$\nu = 1.702 * 10^{-5}\,m^2/s$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{313K}$$

En este caso, la longitud característica es la altura de la placa, la cual es $L = 0.8\,m$ trayendo como consecuencia que el cálculo de calor rechazado se realice por convección libre y no forzada pues la altura no supera el valor de 10 metros. Habiendo buscado los valores necesarios de la Tabla A-15 del Cengel de Transferencia de Calor se calcula el número de Rayleigh.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\nu^2} Pr$$

$$Ra_L = \frac{(9.81m^2/S) * 1/313K * (50^\circ C - 30^\circ C)}{(1.702 * 10^{-5}m^2/S)^2} * 0.7225$$

$$Ra_L = \frac{(9.81m^2/S) * 0.00319 * (20^\circ C)}{3 * 10^{-10}m^2/S} * 0.7225$$

$$Ra_L = \frac{0.625}{(3 * 10^{-10}m^2/S)^2} * 0.7225$$

$$Ra_L = 1.5 * 10^8$$

Se calcula el número Nusselt

$$Nu = \{0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\}^2$$

$$Nu = \{0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\}^2$$

$$Nu = 115.8$$

Luego se procede a calcular **h** en donde:

h es el coeficiente promedio de transferencia de calor sobre la superficie.

$$h = \frac{k}{L} * Nu$$

$$h = \frac{0.02662 W/m^\circ C}{8.74m} * 115.8$$

$$h = 0.35 W/m^2^\circ C$$

Luego se procede a calcular **As** en donde:

As es el área de la superficie de transferencia de calor

$$A_S = L^2$$

$$A_S = (8.88m)^2$$

$$A_S = 79.55m^2$$

Luego teniendo los valores necesarios se procede a calcular el calor rechazado por el biodigestor

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty)$$

$$Q = 0.35 * 79.55 * (323 - 303)$$

$$Q = 561.14W$$

Se calcula el calor que necesita el biodigestor para mantener la temperatura termofílica escogiendo los valores del agua en el Cengel de Termodinámica

$$Q_{dig} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

$$Q_{dig} = 24.5\text{kg/día} * 4.179\text{J/kg K} * (323\text{K} - 273\text{K})$$

$$Q_{dig} = 5119.2W$$

Teniendo los calores necesarios tanto los que pierde el sistema como el necesario para mantener la temperatura termofílica se procede a calcular el calor que necesito suministrarle al biodigestor para mantener los requisitos necesarios

$$Q_{sum} = Q_{dig} + Q_R$$

$$Q_{sum} = 5119.2W + 561.14W$$

$$Q_{sum} = 5673.4 W$$

Para el cálculo de pérdida por la bomba como no se conoce la posición exacta donde se instalara el biodigestor se asumen una serie de valores para facilitar el cálculo del mismo como:

p_2 y p_1 : Las presiones en los espacios de impulsión y de aspiración se tomaran iguales

ρ : la densidad del líquido que se bombea; (que se toma el agua tiene un valor de 1000 kg/m^3)

H_z : La altura geométrica de elevación del líquido: se desconoce su posición con respecto al suelo (si estará enterrada, enterrada parcialmente o en la superficie) se asumirá un valor de 8.8m suponiendo que este expuesto a la superficie

$h_s = 15m$ Suponiéndolo pues se desconoce el esquema real así como la cantidad de tubería necesaria y los accesorios para su creación

$g = 9.81m/s^2$, la aceleración de la caída

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + H_z + h_s$$

$$H = \frac{0}{1000kg/m^3 * 9.81m/s^2} + 8.9 + 15m$$

$$H = 23.9m$$

Se calculara la eficiencia de la bomba

$$N = \frac{2.6 * 10^{-3} m^3/s * 1000kg/m^3 * 9.81m/s^2 * 23.9 m}{1000 * 0.95}$$

$$N = 0.6 \text{ kWh}$$

3.2. Análisis de los resultados

De acuerdo a los cálculos realizados el biodigestor diseñado tiene las siguientes características: termofílico, con temperatura de 50^0C , con tiempo de retención de seis días, de carga continua, con un volumen de $2210 m^3$ el cual generará un total de $2835 m^3$ de biogás al día.

Según Aczia, 2011 la producción media eléctrica bruta por m^3 de biogás (con un contenido del 60% de metano) es de 1.5 kWh, mientras que la producción calorífica media es de 2,3 termías por m^3 (2,67 kWh).

En la tabla siguiente se calcula el consumo de biogás que garantizara la auto-sustentabilidad del sistema propuesto.

Tabla 4 Gasto de equipos instalados al biodigestor

Equipos	No	Consumo, (kWh)	Consumo, (kW día)	Consumo, (kW año)	Consumo anual de biogás (m³)
Agitadores	2	15	360,00	129600	86 400
Bomba	1	0,06	1,54	553	369
Quemador	1	5,67	136,13	49 006	21 307
Total	4				108 076

Se necesitan anualmente 108 076 m³ de biogás para el biodigestor propuesto se autoabastezca de energía.

Los cálculos del biodigestor fueron programados en una hoja de cálculo en Microsoft Excel, y se realizaron varias pruebas utilizando diferentes valores de temperatura 45, 47.5, 50, 52.5 y 55 °C manteniendo en todo momento un régimen termofílico.

Tabla 5 Resultados de los parámetros del biodigestor variando temperatura.

Temperatura del biodigestor, °C	45	47,5	50	52,5	55
Tiempo de retención, días	12	9	6	4	1
Volumen del digestor, m³	4099,7	3130,5	2211,1	1336,5	502,6
calor rechazado, W	631,7	615,5	557,9	449,9	259,1
calor dentro del biodigestor, W	4607,3	4863,3	5119,3	5375,2	5631,3
calor necesario para el sustrato ingresado cada día, W	5234,2	5474,2	5672,9	5821,7	5888,4
Biogás neto, m³	914 137,6	912 289,2	912 521,2	911983,0	911765,3
% Eficiencia	89,4	89,5	89,4	89,4	89,3

Según los resultados obtenidos en la tabla anterior al utilizar temperaturas más altas se obtiene una disminución de los días de retención siendo de 12 días para una temperatura de 45 °C y de 1 día para la temperatura de 55°C, y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa coincidiendo con lo reportado por Pedroso, 2014, en cuanto al calor necesario para el sustrato se observa que aumenta al aumentar la temperatura y la producción de biogás disminuye al aumentar la temperatura porque el consumo de energía aumenta, la eficiencia se mantiene alrededor de 89% en todos los casos.

A la temperatura seleccionada de 50°C se analizará el % de variación de altura del biodigestor con respecto a la superficie, estos resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Resultados de la variación de altura del biodigestor a temperatura de 50°C con respecto a la superficie.

% del biodigestor en la superficie	100	75	50	25
Tiempo de retención (días)	6	6	6	6
Volumen del digestor, en m³	2211,1	2211,1	2211,1	2211,1
calor rechazado (W)	558,4	314,1	139,6	34,9
calor en el biodigestor (W)	5119,3	5119,3	5119,3	5119,3
calor necesario para el sustrato ingresado cada día (W)	5673,4	5431,0	5257,8	5153,9
Biogás neto m³	912518,9	913464,0	914148,9	914573,5
% Eficiencia	89,4	89,5	89,6	89,6

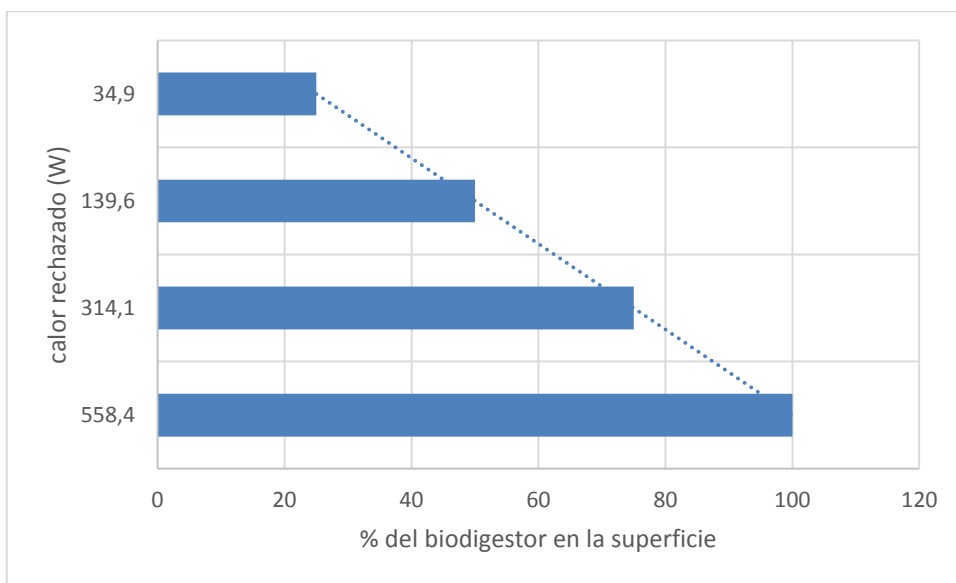


Grafico 1 Relación entre el calor rechazado en W y la variación de altura del biodigestor a temperatura de 50°C .

Del análisis realizado se observa que a medida que el biodigestor se introduce más en la tierra pues disminuye el calor rechazado y disminuye el calor necesario para el sustrato y aumenta la producción de biogás porque el consumo es menor.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El estudio bibliográfico realizado mostró la pertinencia del empleo del biogás como tecnología limpia y eficiente para la producción de energía atendiendo al estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad y el aprovechamiento de la biomasa húmeda.
2. Se determinó que el biodigestor a utilizar para los residuos porcinos del municipio de Placetas sea del tipo termofílico, modelo de tapa de cúpula móvil de carga continua de un volumen de aproximadamente 2100 m³.
3. El balance térmico y energético realizado determinó que el biodigestor brinda una eficiencia del 89,4% de acuerdo a la disponibilidad de biomasa del municipio Placetas referente al porcino, de forma eficiente y autosustentable.
4. De los resultados obtenidos de los parámetros del biodigestor calculados para diferentes temperaturas en el régimen termofílico se tiene que la temperatura influye fundamentalmente en el tiempo de retención y en el volumen del biodigestor.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis de la localización del biodigestor, para definir el lugar idóneo según las consideraciones aquí realizadas.
2. Evaluar desde el punto de vista económico la propuesta aquí realizada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aczia Biogás. Estudio básico del biogás (2011). Consultado en https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_o_basico_del_biogas_0.pdf
2. Agencia Andaluza de Energía (2011). Estudio básico del biogás. Conserjería de economía, innovación y ciencia. Documento digital, Andalucía, España. Septiembre, 2011. https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_o_basico_del_biogas_0.pdf
- Avila Soler, E. (2009). Biogás: opción real de seguridad energética para México. http://www.academia.edu/4184340/Tesis_biogas
3. Asociación Cubana de Producción Animal (2000). Biodigestores. Biogás y bioabonos: un sistema tecnológico “limpio”. <http://observatorio.ihatuey.cu/wp-content/uploads/2013/12/Biodigestoresbiogasybioabonos.pdf>
4. Bérriz, L. Las fuentes renovables de energía en el desarrollo local sostenible. Power Point.
5. Blanco Betancourt, D., Cepero Casas, Suárez Hernández, J.y Martín Martín, G. J. (2012). Manual de diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba. Matanzas: Ed. Estación Experimental de Pastos y Forrajes.
6. Carabeo Garay, T. (2013). Evaluación del lodo de la planta de producción de biogás de la UEB Complejo Guayos para su uso como biofertilizante. <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/2237>
7. Cengel, Y.A. y Ghajar, A.J. Tansferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones. [http://www.academia.edu/14777858/Transferencia de Calor y Masa 4ta Edicion Yunus A. Cengel Afshin J. Ghajar](http://www.academia.edu/14777858/Transferencia_de_Calor_y_Masa_4ta_Edicion_Yunus_A._Cengel_Afshin_J._Ghajar)
8. Contreras Velázquez L.M. (2013). Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arroceras cubana para la producción de biogás. <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/6613/TESIS%20LUZ%20MARIA%20SEPT%202013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

9. Díaz de Basurto Burgos, A. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya.
<https://es.scribd.com/document/279440868/Construccion-de-Biodigestor-de-R-S-U>
10. David Muto Lubota, D., Hernández Pérez, G., Rosario, J. F. B. do, Mamade Toure, B. y Pedraza Garciga, J. (2014). Disponibilidad de biomasa como fuente de productos químicos y energía en Cabinda, Angola. Pdf.
11. Elizondo, D. El biodigestor. (2005). El biodigestor.
http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_animal/brochure-biodigestor.pdf
12. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Agencia de Recursos Renovables) (2010). Guía sobre el Biogás. Desde la producción hasta el uso.
<https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples//e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>
13. Gestión Integral de Inversión en plantas de Biogás. Consultado en
http://www.energrecol.com/ficheros_pdf/Plata%20de%20%20Biogas%20Dossier%20inversores.pdf
14. González Satorre, R.D. (2016). Futuro de la energía renovable en Cuba y VC hasta el 2030. Power Point.
15. González Satorre, R.D. (2016). Indicaciones a las Entidades para la inclusión en el Plan de la economía de inversiones 2017-2021 para dar cumplimiento al cronograma de implantación de la Política Energética Nacional. Power Point.
16. Hilbert, J.A. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_producin_de_biogs_del_iir.pdf
17. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007). Biomasa: Digestores anaerobios.
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
18. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF (2011). Manual de biogás.
<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.
19. Moltoni, A. y Huerga, I. Caracterización térmica de un biodigestor para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos rurales. Pdf

20. Olaya Arboleda, Y. y González Salcedo, L.O. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. <http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>
21. Pérez Medel, J.A. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros.. http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-perez_jm/pdfAmont/cf-perez_jm.pdf
22. PNUD. Disminución de las emisiones de metano a la atmósfera mediante el uso de biodigestores tubulares de polietileno en el manejo del estiércol del ganado porcino. Pdf.
23. Rubio Loza, L.A., Orozco Rabadán, S., Cabirol, N. y Noyola, A. Estabilización de lodos de desecho por digestión anaerobia termofílica. <http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Estloddessdiganamx.pdf>
24. Sánchez Rodríguez, J. Planta de Biogás Proyecto IWCAM, Finca San Juan. Pdf
25. Sas Brunser, Sebastián Marcos. (2012). Análisis económico-energético de la biomasa lignocelulósica en Chile. <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1899/598280.pdf?sequence=1>
26. Sebastián Nogués, F. y Royo Herrero, J. (2002). Ciclo Energías Renovables. Jornadas de biomasa. http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random4991a1ff1b986/1234281334_Gralidades_biomasa.pdf
27. Silva Vinasco, J.P. (2016). Tecnología del biogás. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf>
28. Suárez Lastre, Y. La biomasa y otras fuentes renovables de energía en Cuba. <http://www.oas.org/dsd/Energy/Documents/SimposioG/3%20Panel%20I%20Biogas.pdf>
29. Toala Moreira, E. E. (2013). Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el Rancho Verónica. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3406/1/236T0100.pdf>
30. Unidad de Planeación Minero Energética (2003). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión.

http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/ANTEPROYECTO_DE_NORMA-CELDAS_Y_BATERIAS_SECUNDARIAS_PARA_SIS.pdf

ANEXOS



Ilustración 2 Biodigestor de lecho expandido



Biodigestor CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)

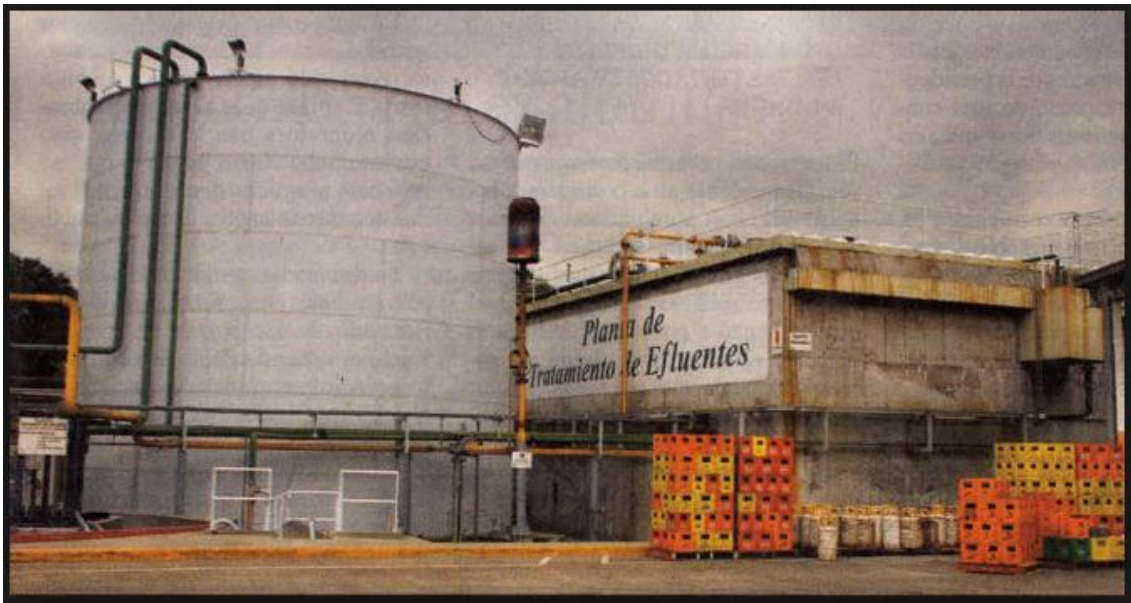


Ilustración 3 Biodigestor UASB



Ilustración 4 Biodigestor de dos etapas

SISTEMA DE AGITACIÓN

