

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE UTILIZACIÓN
DE BIOMASA PARA SUPLIR NECESIDADES ENERGÉTICAS EN EL
EDIFICIO DE BIENESTAR UNIVERSITARIO**

NELSON ANDRÉS RODRÍGUEZ MIRANDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2010



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de
Telecomunicaciones



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE UTILIZACIÓN
DE BIOMASA PARA SUPLIR NECESIDADES ENERGÉTICAS EN EL
EDIFICIO DE BIENESTAR UNIVERSITARIO**

NELSON ANDRÉS RODRÍGUEZ MIRANDA

Trabajo para optar por el título de Ingeniero Electricista

DIRECTOR

PhD. Msc. Ing. GILBERTO CARRILLO CAICEDO

CODIRECTOR

MIE. (c) Ing. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2010

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. BIOMASA	14
2.1.1. Tipos de biomasa	14
2.1.2. Tecnologías utilizadas para el aprovechamiento de la biomasa	15
2.1.2.1. Combustión directa.	15
2.1.2.2. Procesos termoquímicos.....	15
2.1.2.3. Proceso biológicos.	16
2.1.2.4. Esterificación.....	17
2.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA	17
2.2.1. Etapas de la digestión anaerobia.	18
2.2.1.1. Etapa sólida o hidrolisis.....	18
2.2.1.2. Etapa líquida o acetogénica	19
2.2.1.3. Etapa gaseosa o metanogénica.	20
2.2.2. Temperatura de la digestión anaerobia	20
2.2.3. Composición del biogás	20
2.2.4. Limpieza del biogás.....	21
2.2.5. Efluente	22
2.2.6. Beneficios asociados a la digestión anaerobia	22
2.3. BIODIGESTOR	22
2.3.1. Tipos de biodigestores	22
2.3.1.1. Flujo discontinuo.	22
2.3.1.2. Flujo continuo.....	23
2.3.1.3. Domo fijo	23
2.3.1.4. Domo flotante.....	24

2.3.1.5. Tipo balón.	24
2.3.1.6. Otros tipos de biodigestores.....	25
2.3.2. Volumen de un biodigestor.....	25
2.3.2.1. Tiempo de retención hidráulico.	25
2.3.2.2. Temperatura de operación.	26
2.3.2.3. Materia prima para la carga.	26
2.3.2.4. Almacenamiento del biogás.	26
2.4. CELDA DE COMBUSTIBLE.....	26
2.4.1. <i>Phosphoric acid fuel cell (PAFC)</i>	28
2.4.2. <i>Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)</i>	29
2.4.3. <i>Solid oxide fuel cell (SOFC)</i>	29
2.4.4. <i>Molten carbonate fuel cell (MCFC)</i>	29
2.5. GAS NATURAL.....	29
2.6. CASOS PREVIOS.....	30
3. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA GENERADA.	36
3.1. BIOMASA ANTES DE LA COCCIÓN.	37
3.2. BIOMASA DESPUÉS DE COCCIÓN	37
3.3. AGUAS RESIDUALES	38
3.4. POSIBLE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	39
3.5. POTENCIAL ENERGÉTICO	42
3.6. BIOGÁS, GAS NATURAL Y ENERGÍA ELÉCTRICA	42
4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA A PLANTEAR	44
4.1. BIODIGESTOR PARA LOS RESIDUOS DE COMIDA Y RESIDUOS VEGETALES	44
4.1.1. Variables asociadas al dimensionamiento.....	45
4.1.2. Tiempo de retención hidráulico	45
4.1.3. Materia orgánica para la carga diaria	46
4.2. BIODIGESTOR PARA LAS AGUAS RESIDUALES.	48
4.3. RECOMENDACIONES PARA DETERMINAR LA CARGA A ALIMENTAR ..	50

4.4. CELDA DE COMBUSTIBLE.....	51
4.5. EQUIPO ELECTRÓGENO.....	52
4.6. COCCIÓN DE ALIMENTOS.....	53
5. ANÁLISIS FINANCIERO.....	55
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Plantas instaladas por <i>Biogas Nord</i>	31
Tabla 2. Resumen de características del proyecto piloto ROBAGO.	32
Tabla 3. Resumen de características del diseño planteado en el artículo.	33
Tabla 4. Resumen de características del diseño propuesto en la tesis.	33
Tabla 5. Resumen de características del diseño planteado en la tesis.	34
Tabla 6. Resumen de características del diseño planteado en la tesis.	35
Tabla 7. Resumen de la semana tipo.	39
Tabla 8. m ³ de biogás generados en un día, para cada tipo de residuo.	40
Tabla 9. Posible producción de biogás en un día.	41
Tabla 10. Potencial energético de los residuos vegetales y de comida.	42
Tabla 11. Potencial energético de las aguas residuales.	42
Tabla 12. Resumen de las características del biodigestor para trabajar con los residuos de comedores.	47
Tabla 13. Resumen de las características del biodigestor para trabajar con las aguas residuales.	49
Tabla 14. Consumo de los quemadores.	54
Tabla 15. Precio del kWh y el m ³ de gas natural.	55
Tabla 16. Ahorro generado en energía eléctrica al año, utilizando la celda de combustible o el grupo electrógeno.	55
Tabla 17. Ahorro generado utilizando biogás en reemplazo del gas natural.	55
Tabla 18. Costos de los equipos.	56
Tabla 19. Costo asociado a las actividades de mantenimiento.	57
Tabla 20. TIR y VPN para cada una de las opciones.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resumen biodigestión.	17
Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia.....	18
Figura 3. Reacciones químicas asociadas a la hidrólisis.	19
Figura 4. Reacciones químicas de la etapa acidogénica.	19
Figura 5. Reacciones químicas de la etapa acetogénica.	19
Figura 6. Reacciones químicas de la etapa metanogénica.....	20
Figura 7. Filtro para la remoción del ácido sulfhídrico.....	21
Figura 8. Biodigestor de domo fijo.	23
Figura 9. Biodigestor de domo flotante.	24
Figura 10. Biodigestor tipo balón.	25
Figura 11. Reacción química de acuerdo al tipo de celda de combustible.	27
Figura 12. Resumen del tipo de celda y la potencia.	28
Figura 13. Reacciones químicas según el tipo de celda.	28
Figura 14. Promedio diario del peso de residuos de verdura.....	37
Figura 15. Promedio diario de residuos de comida.....	38
Figura 16. Caseta de recolección de los residuos de comedores.....	46
Figura 17. Interior de la caseta de alimentación.	46
Figura 18. Biodigestor propuesto para los residuos vegetales y de comida.	48
Figura 19. Biodigestor propuesto para las aguas residuales.	50
Figura 20. Circuito unifilar utilizando celda de combustible.	52
Figura 21. Circuito unifilar utilizando grupo electrógeno.	53
Figura 22. Comportamiento del VPN con diferentes tasas de descuento.....	57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: INVENTARIO RESIDUOS VEGETALES Y RESIDUOS DE COMIDA .	65
ANEXO B: DETERMINACION DEL PESO DE LA BIOMASA.....	67
ANEXO C: COSTO DE LOS BIODIGESTORES	68

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE UTILIZACIÓN DE BIOMASA PARA SUPLIR NECESIDADES ENERGÉTICAS EN EL EDIFICIO DE BIENESTAR UNIVERSITARIO¹

AUTOR: NELSON ANDRÉS RODRÍGUEZ MIRANDA²

PALABRAS CLAVES: fuentes de energía renovable, biogás, celdas de combustible.

DESCRIPCIÓN:

Se presenta un estudio de factibilidad técnica y financiera que permita la toma de decisión sobre el aprovechamiento de la biomasa generada debido al servicio de comedores que presta la Universidad Industrial de Santander en su campus central. Esta iniciativa fue motivada por el deseo de mejorar los índices de sostenibilidad del campus universitario a partir del uso de fuentes de energía renovable, generar un ahorro en el servicio energético y dar efectivo tratamiento a residuos de forma tal que se reduzca su impacto ambiental.

Se propone la obtención de biogás a partir del aprovechamiento de la biomasa en un biodigestor de flujo continuo, principalmente por la producción diaria de biomasa. Debido a que las necesidades energéticas de la edificación en cuestión se deben a la cocción de alimentos y a la alimentación eléctrica de cargas, mayormente lámparas fluorescentes y de equipos de cómputo, se estiman dos opciones para el aprovechamiento del biogás. La primera es utilizar el biogás, para que se sustituya parte del consumo de gas natural en la cocción de alimentos; la segunda, es la generación de energía eléctrica a partir de una celda de combustible ó grupo electrógeno, sustituyendo parte de la energía eléctrica

La primera etapa del estudio consistió en caracterizar la biomasa generada por el servicio de comedores de la universidad, es decir se identificó tipo de residuos, potencial generador de biogás, tiempos de generación de biogás y frecuencia de producción de residuos. A partir de esta información, se estimó el biogás posible a obtener, con lo que se realizó el dimensionamiento del biodigestor y demás elementos técnicos, así como los ahorros financieros en la energía consumida por la edificación al aprovechar la biomasa.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD. Msc. Ing. Gilberto Carrillo Caicedo. Codirector: MIE. (c) Ing. Germán Alfonso Osma Pinto.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL AND FINANCIAL FEASIBILITY STUDY OF BIOMASS UTILIZATION TO MEET ENERGY NEEDS IN THE BUILDING OF THE “BIENESTAR UNIVERSITARIO”³

AUTHOR: NELSON ANDRÉS RODRÍGUEZ MIRANDA⁴

KEYWORDS: renewable energy source, biogas, fuel cells.

DESCRIPTION:

In this project, It presents a study technical and financial allowing make decision about use of biomass provided by canteen in the Universidad Industrial de Santander, to satisfy part of the energy needs of the building where this service is provided. This initiative was motivated by the desire to improve the percentage of campus sustainability through the use of renewable energy sources, generating savings in energy service and give effective waste treatment so as to reduce their environmental impact.

It is proposed biogas extraction from biomass using a continuous flow digester, mainly by the daily production of biomass. The energy needs of the building in question are due to food cooking and electrical loads, mainly, fluorescent lighting and computer equipment. Therefore, two options are estimated for the use of biogas. First, use of biogas to replace part of the natural gas consumption in kitchen, and second is the generation of electricity from a fuel cell or biogas generator set.

First stage of this study was to characterize the biomass generated by the canteen at the University, identify type of waste, potential of biogas, times of biogas generation and frequency of waste production. From this information, in the present project was estimated the amount of biogas that can be obtained, it was made the sizing of the digester and other technical elements, and the financial saving in energy consumed were calculated for the building with use of biomass energy.

³Final Graduate Project.

⁴Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School. Director: PhD. Msc Ing Gilberto Carrillo Caicedo. Co-director: MIE. (c) Ing. Germán Alfonso Osma Pinto

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de alternativas de producción energética, mediante la implementación de prácticas amigables con el ambiente y el aprovechamiento de los recursos disponibles, ha creado un clima favorable para la promoción e implementación de tecnologías que involucren energías renovables. En este sentido, la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía, como la biomasa, es actualmente una opción atractiva, ambientalmente sostenible y de menor impacto negativo al medio ambiente.

Se denomina biomasa a la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo, o provocado, utilizable como fuente de energía, esta biomasa puede utilizarse para suplir parte de la demanda energética de una edificación, al someterla a procesos donde se extraen productos como combustibles sólidos (carbón natural), líquidos (metanol) y gaseosos (biogás, gas de síntesis). En este contexto el presente trabajo se enfoca en establecer las características técnicas de diferentes sistemas, que permitan la utilización de la biomasa procedente de la sección de comedores, con el fin de obtener energía eléctrica y/o calor para la cocción de alimentos, en el edificio de Bienestar Universitario.

Es necesario conocer la cantidad de biomasa generada en el servicio de comedores, lo cual es la base para determinar las características técnicas del sistema que permita la obtención del biogás¹ y los sistemas para su aprovechamiento, ya sea energía eléctrica² y/o calor³.

¹ Biodigestor.

² La generación de energía eléctrica se logra mediante el uso de celdas de combustible ó equipo electrógeno.

³ Utilizar el biogás directamente en la cocción de los alimentos

2. MARCO TEÓRICO

En el este capítulo se presente información general sobre las interacciones que implica el uso de biomasa, el proceso de digestión anaerobia y la obtención de biogás, y el funcionamiento básico de las celdas de combustible.

2.1 BIOMASA

La biomasa para fines ecológicos es la materia total de los seres (animales y vegetales) que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen; mientras que para fines energéticos, se define como la materia orgánica originada en un proceso biológico, ya sea espontáneo o provocado, utilizado como fuente de energía [12].

La biomasa es utilizada para extraer biogás en el caso de los rellenos sanitarios o en plantas anaerobias de tratamiento de residuos o se puede extraer calor por medio de la combustión directa de madera o residuos sólidos urbanos. Los tipos de biomasa son muy diversos, incluye la biomasa forestal, cultivos energéticos, residuos agrícolas, estiércoles, lodos de aguas residuales, entre otros [7, 9].

2.1.1. Tipos de biomasa

La biomasa puede subdividirse en biomasa residual húmeda y seca. Dentro de la biomasa residual húmeda se encuentran todos los residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, el estiércol porcino y vacuno. La biomasa seca se clasifica según el sector productivo que la emite, este tipo de biomasa puede incluir residuos forestales de la industria maderera, residuos agroindustriales de la producción de alimentos, residuos de plantaciones, residuos de poda y maleza, residuos de mataderos de ganado, aceites y grasas, lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (industriales y residenciales), residuos sólidos urbanos y estiércol avícola [9].

2.1.2. Tecnologías utilizadas para el aprovechamiento de la biomasa

Teniendo en cuenta que la biomasa es un recurso que se presenta en una variedad de materiales diferentes: madera, aserrín, paja, restos de semillas, estiércol, residuos de papel, residuos domésticos, aguas residuales, etc., algunos materiales puedan utilizarse directamente como combustibles y otros requieren tratamientos previos para ser aprovechados. Existen procesos tan simples como la combustión directa, hasta procesos mucho más complejos como la esterificación [4]. Algunas tecnologías utilizadas para el aprovechamiento de la biomasa son:

2.1.2.1. Combustión directa. La combustión directa es el sistema más antiguo de extracción de energía de la biomasa. La materia orgánica (combustible) reacciona químicamente con el oxígeno (carburante) en una reacción exotérmica, obteniéndose dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y si los elementos azufre y nitrógeno forman parte de los reactivos, óxidos de azufre (SO_x) y nitrógeno (N_xO_2). Mediante la combustión directa de la biomasa se produce la transformación de la energía química almacenada en ella, en energía calórica. El calor generado, puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica y/o calefacción [4].

2.1.2.2. Procesos termoquímicos. La biomasa es sometida a diferentes procesos de oxidación, a condiciones de temperatura y presión establecidas, para obtener combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Si el proceso se lleva a cabo en ausencia parcial de oxígeno se denomina gasificación, por otra parte, si el proceso se realiza en ausencia de oxígeno se denomina pirolisis.

- *Gasificación*, en este proceso el combustible sólido es oxidado parcialmente para producir un combustible gaseoso, el cual contiene CO , CO_2 , H_2 , CH_4 y vapor de agua. La proporción obtenida de cada uno de los componentes son función de los materiales empleados (composición, grado de humedad, tamaño y uniformidad de las partículas, etc.), de las condiciones en que se lleva a cabo

el proceso (con aire o con oxígeno puro, presión de operación, temperatura del proceso, etc.) y del tipo de gasificador utilizado [4].

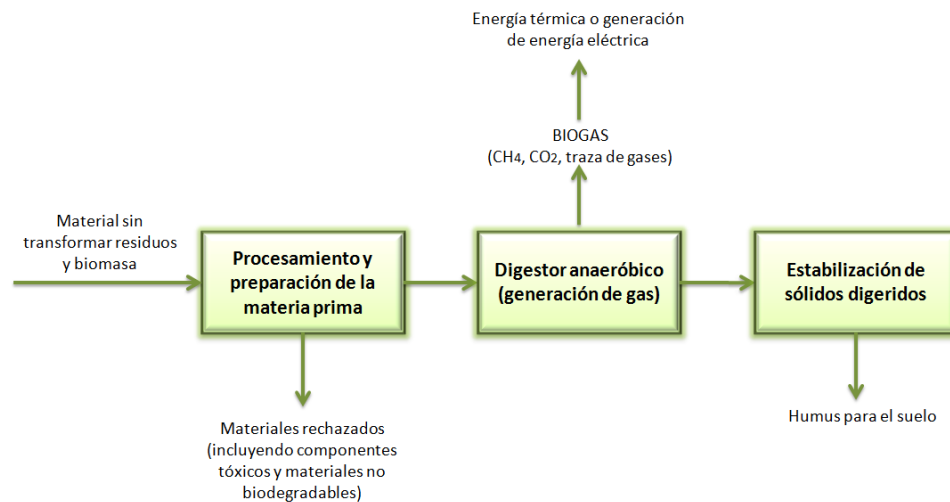
- *Pirolisis*, este proceso es utilizado para procesar un combustible con el propósito de obtener otro mejor. La pirolisis convencional requiere el calentamiento de materia original con la ausencia total de oxígeno. La biomasa empleada (residuos agrícolas y forestales, residuos sólidos urbanos) y las condiciones de operación del proceso (temperatura, presión, etc.) son los factores que determinan la composición y tipo de producto obtenido. Los productos obtenidos pueden ser carbón vegetal, combustibles líquidos y combustible gas [4].

2.1.2.3. Proceso biológicos. En estos procesos la biomasa húmeda se degrada mediante el metabolismo de microorganismos, que contiene la biomasa o que se incorporan al proceso. Los dos procesos más conocidos son:

- *Digestión anaerobia* como su nombre lo indica, este proceso se lleva a cabo en ausencia de aire, la descomposición se lleva a cabo por medio de bacterias. Los materiales de la biomasa utilizados suelen ser residuos ganaderos (estiércol de animales, residuos obtenidos de depuradoras de aguas residuales, residuos de industrias orgánicas, etc.). El producto resultante es el biogás, con un contenido de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con efluente. Los componentes sólidos del efluente pueden emplearse como fertilizante de terrenos [4].

En la figura 1, se observa de manera general el proceso de digestión anaerobia.

Figura 1. Resumen biodigestión.



Fuente: Adaptado de [16]

- *Fermentación alcohólica*, los azúcares que contienen las plantas pueden transformarse en alcohol mediante la intervención de determinados organismos. Los biocombustibles obtenidos son fundamentalmente el metanol ($\text{CH}_3(\text{OH})$), y el etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2(\text{OH})$) [4].

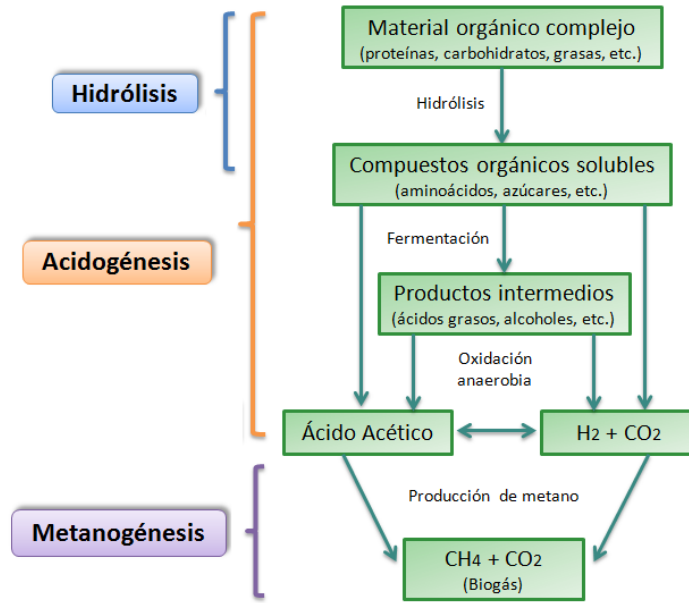
2.1.2.4. Esterificación. Este proceso es utilizado para obtención de biodiesel utilizando los aceites de semillas oleaginosas, las cuales, después de un proceso de extracción y refinado, se someten a un proceso químico con el propósito de obtener éster metílico. Los aceites vegetales están constituidos por moléculas de triglicéridos, conectadas a la glicerina a través de enlaces de ésteres. En el proceso se sustituye la glicerina por metanol (alcohol metílico) que se añade al proceso, obteniéndose moléculas lineales parecidas a los hidrocarburos presentes en el diesel [4].

2.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA

En el proceso de digestión anaerobia involucra poblaciones de microorganismos encargados en la descomposición de la materia orgánica, este proceso se lleva a

cabo en tres etapas fundamentales (figura 2), una primera etapa sólida, seguida de una etapa líquida y finalmente una tercera etapa gaseosa.

Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia.



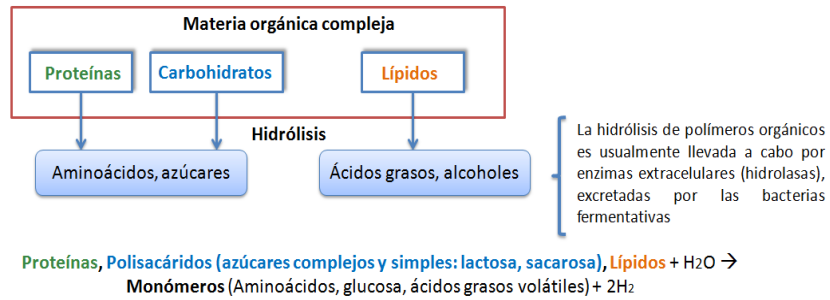
Fuente: Adaptado de [16]

2.2.1. Etapas de la digestión anaerobia.

Son básicamente tres etapas generales para la digestión anaerobia y la obtención del biogás, estas son:

2.2.1.1. Etapa sólida o hidrolisis. En esta etapa las sustancias como los carbohidratos, lípidos y proteínas (presentes en la materia orgánica) son atacadas por bacterias fermentativas, las cuales se encargan de la producción de ácidos grasos, glucosa y aminoácidos. Esta etapa sólida, la acción primordial es la producción de azúcares simples como la glucosa, fructosa y galactosa [4, 11, 14]. Las reacciones químicas asociadas se muestran en la figura 3.

Figura 3. Reacciones químicas asociadas a la hidrólisis.



Fuente: Adaptado de [18].

2.2.1.2. Etapa líquida o acetogénica. En esta etapa, los azúcares producidos en la etapa sólida son atacados por bacterias propiónicas, bacterias acidogénicas (figura 4) y bacterias acetogénicas, formando ácidos orgánicos (figura 5). Esta etapa líquida se conoce como etapa acetogénica, la acción primordial es la transformación de los azúcares en ácidos orgánicos [4, 11, 14].

Figura 4. Reacciones químicas de la etapa acidogénica.

Tipo de reacción	Ecuación
Fermentación de glucosa a acetato	Glucosa + 4H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + 4H ⁺ + 4H ₂
Fermentación de glucosa a butirato	Glucosa + 2H ₂ O → C ₄ H ₇ O ₂ + 2HCO ₃ ⁻ + 3H ⁺ + 2H ₂
Fermentación del butirato a acetato e H ₂	Butirato + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + H ₂
Fermentación del propionato a acetato	Propionato + 3H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + H ₂

Fuente: Adaptado de [22].

Figura 5. Reacciones químicas de la etapa acetogénica.

REACCIONES ACETOGÉNICAS	
Etanol y ácido láctico	
Etanol + H ₂ O	→ Acetato + H ⁺ + 2H ₂
Lactato ⁻¹ + 2H ₂ O	→ Acetato ⁻¹ + H ⁺ + 2H ₂ + HCO ₃ ⁻
Ácidos graso	
Acetato ⁻¹ + 4H ₂ O	→ H ⁺ + 4H ₂ + 2HCO ₃ ⁻
Propionato ⁻¹ + 3H ₂ O	→ Acetato ⁻¹ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + 3H ₂
Butirato ⁻¹ + 2H ₂ O	→ 2Acetato ⁻¹ + H ⁺ + 2H ₂
Valerato ⁻¹ + 3H ₂ O	→ 3Acetato ⁻¹ + 2H ⁺ + 4H ₂
Aminoácidos	
Alanina + 3H ₂ O	→ Acetato ⁻¹ + HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ + H ⁺ + 2H ₂
Aspartato ⁻¹ + 4H ₂ O	→ Acetato ⁻¹ + 2HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ + H ⁺ + 2H ₂
Leucina ⁻¹ + 3H ₂ O	→ isovalerato ⁻¹ + HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ + H ⁺ + 2H ₂
Glutamato ⁻¹ + 4H ₂ O	→ propionato ⁻¹ + 2HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ + H ⁺ + 2H ₂
Glutamato ⁻¹ + 7H ₂ O	→ acetato ⁻¹ + 3HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ + 3H ⁺ + 5H ₂

Fuente: Adaptado de [22].

2.2.1.3. Etapa gaseosa o metanogénica. En esta etapa, las bacterias metanogénicas (figura 6) se alimentan de los ácidos orgánicos para producir principalmente metano CH₄ y gases ácidos como dióxido de carbono CO₂ y SH₂. Es la más importante debido a que las bacterias metanogénicas requieren de condiciones controladas de temperatura para la continuidad del proceso [4, 11, 14].

Figura 6. Reacciones químicas de la etapa metanogénica.

Tipo de sustrato	Reacción química
Tipo CO ₂	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Tipo CO ₂	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Tipo CO ₂	$4\text{HCOO}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Acetato	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$
Tipo metilo	$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
Tipo metilo	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
Tipo metilo	$2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{CH}_3\text{COOH}$

Tipo de sustrato:

CO₂ = CO₂, HCOO⁻, CO

Metil = CH₃OH, CH₃NH₃, (CH₃)₂NH₂⁺, (CH₃)₃NH⁺, CH₃SH, (CH₃)₂S

Acetato = CH₃COO⁻

Fuente: Adaptado de [18].

2.2.2. Temperatura de la digestión anaerobia

Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesofílico (temperatura en torno a los 35°C) o termofílicos (temperatura en torno a los 55°C). Las tasas de crecimiento y reacción son proporcionales a la temperatura, haciendo más sensible el proceso a los cambios en la temperatura en el orden termofílico, asegurando tasas superiores de destrucción de patógenos comparado con los otros rangos [4, 11, 14].

2.2.3. Composición del biogás

La composición del biogás depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada. A continuación se presenta una composición típica del biogás:

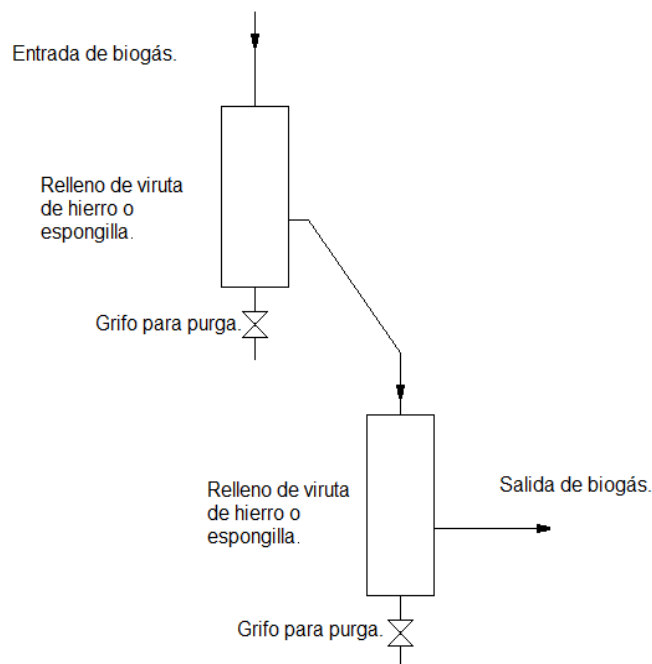
- 50- 70% de metano CH₄.
- 30 - 40% de anhídrido de carbónico CO₂.
- ≤ 5% de hidrógeno H₂, ácido sulfhídrico H₂S, y otros gases.

Salvo por el contenido de H₂S, el biogás es un combustible que puede ser utilizado por un equipo electrógeno, estufas, calentadores, celdas de combustible, entre otros [1].

2.2.4 Limpieza del biogás.

Para la utilización del biogás, se necesita someterlo a etapas encargadas de remoción del ácido sulfhídrico, de hidrocarburos halógenos (presente en el gas de vertedero), de siloxanos (presente en el gas de vertedero y aguas residuales), así como la remoción de humedad [18]. Lo recomendado en [25] para la remoción del ácido sulfhídrico se muestra en la figura 7, donde se utiliza un recipiente lleno de hierro finamente dividido, formando un lecho poroso, a través del cual debe circular el gas, para que el H₂S reacciona con el metal y se deposite en el lecho.

Figura 7. Filtro para la remoción del ácido sulfhídrico.



Fuente: Adaptado de [25]

2.2.5. Efluente

El efluente o lodo producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica (material desgasificado), puede ser utilizado como fertilizante orgánico, previamente realizado estudios de presencia de patógenos y posteriormente, un proceso de decantación, sedimentación, estabilización, secado y compostaje [1].

2.2.6. Beneficios asociados a la digestión anaerobia

En los diferentes procesos que se llevan a cabo en la digestión anaerobia, se obtienen beneficios asociados como:

- Reducción significativa de malos olores.
- Mineralización.
- Producción de energía renovable si el biogás se aprovecha energéticamente.
- Reducción de gases de efecto invernadero derivadas de la reducción de emisiones incontroladas de CH₄, el cual produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO₂ [1,4].

2.3. BIODIGESTOR

En el proceso de digestión anaerobia, se utiliza un reactor herméticamente sellado para el confinamiento del material orgánico, existen diferentes configuraciones, diseños y funcionamientos. Algunas clasificaciones tienen en cuenta la frecuencia de alimentación del biodigestor, su construcción, etc [25].

2.3.1. Tipos de biodigestores

Dependiendo del tipo de carga, los biodigestores pueden clasificarse como:

2.3.1.1. Flujo discontinuo. En los sistemas discontinuos o *batch*, una vez se carga la biomasa, el biodigestor es cerrado por un tiempo fijo de retención hasta

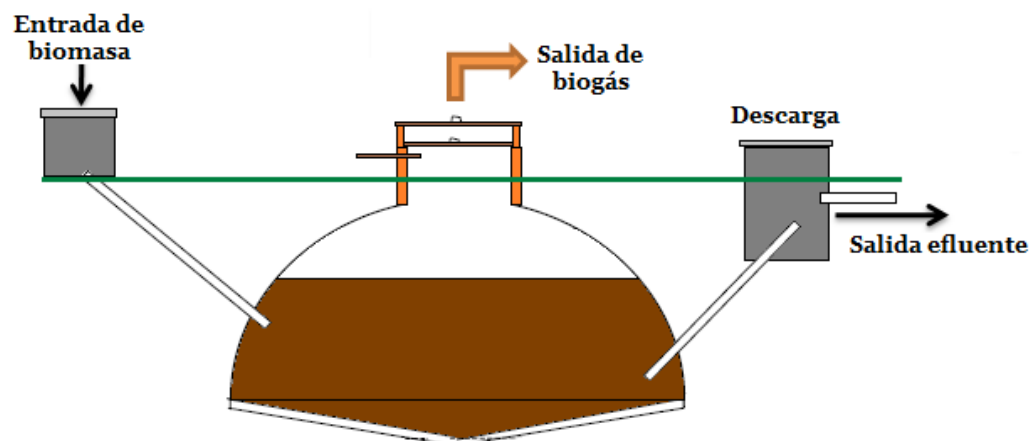
que haya terminado el proceso de digestión anaerobia y no haya producción de biogás. Durante este período, la producción de gas aumenta paulatinamente hasta un máximo y luego declina, finalizando el proceso. [7,25]

2.3.1.2. Flujo continuo. En los biodigestores continuos, se cargan y descargan con una frecuencia determinada, una o varias veces al día. La producción de biogás se mantiene siempre y cuando se mantenga la frecuencia de la carga y no se presenten reacciones que inhiban el proceso, por ejemplo la acidificación [7,25].

Dependiendo de la forma y estructura, los biodigestores pueden clasificarse como:

2.3.1.3. Domo fijo. Este tipo de biodigestor (figura 8) tiene como principal característica que trabaja con presión variable y como desventaja se destaca que la presión de gas no es constante y la cúpula debe ser completamente hermética. Sin embargo este biodigestor presenta la ventaja de que los materiales de construcción son fáciles de adquirir a nivel local, así como la inexistencia de partes metálicas que pueden oxidarse y una larga vida útil si se le da un adecuado mantenimiento [7,25].

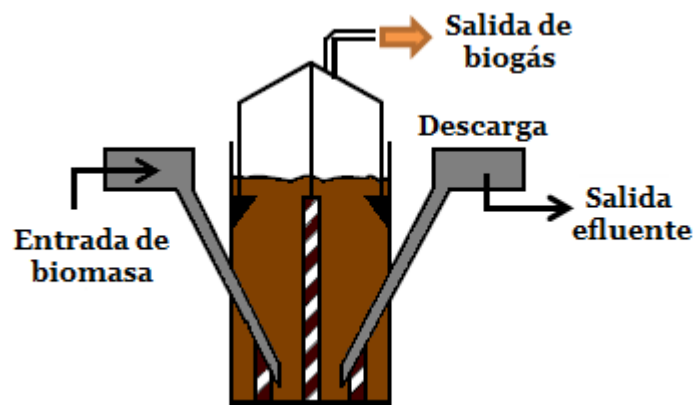
Figura 8. Biodigestor de domo fijo.



Fuente: Adaptado de [25].

2.3.1.4. Domo flotante. Este tipo de biodigestor (figura 9) es conocido como tipo Hindú, la ventaja considerable es que trabaja a presión constante (debida al peso del domo), las desventajas radican en el movimiento que requiere el domo, lo cual implica costos adicionales en los materiales necesarios para la construcción y mantenimiento, sello hidráulico, etc [7,25].

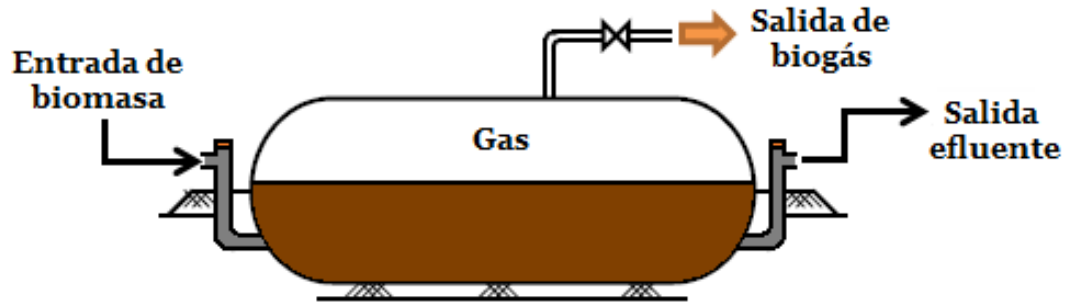
Figura 9. Biodigestor de domo flotante.



Fuente: Adaptado de [25].

2.3.1.5. Tipo balón. Este modelo consiste en una bolsa o balón plástico completamente sellado (figura 10), donde el gas se almacena en la parte superior, aproximadamente un 25% del volumen total. Tiene como desventajas, que debido a su baja presión es necesario colocar sobrepesos al balón para aumentarla, su vida útil es corta, de aproximadamente 5 años, y el material plástico debe ser resistente a la intemperie, así como a los rayos ultravioletas. Su mayor ventaja es que la instalación es rápida y sencilla y el costo, en relación con el modelo de cúpula fija, se reduce en un 50% o más [7,25].

Figura 10. Biodigestor tipo balón.



Fuente: Adaptado de [25].

2.3.1.6. Otros tipos de biodigestores. Existen otros tipos de digestores desarrollados recientemente y en proceso de investigación entre los cuales pueden nombrarse los de filtro anaeróbico, reactor de deflector anaeróbico, procesos de contacto anaeróbico, digestores tubulares inclinados, etc. [25].

2.3.2. Volumen de un biodigestor

El dimensionamiento del biodigestor realizado en este trabajo se basa en la metodología expuesta en el documento ANC-0603-19-01, *Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás*, desarrollado por la Unidad de Planeación Minero Energética, en el cual, para determinar el volumen del biodigestor se requiere determinar la cantidad de biomasa disponible para la carga y su densidad, el tiempo de retención hidráulico y un factor de sobredimensionamiento para el almacenamiento del biogás [7,25].

2.3.2.1. Tiempo de retención hidráulico. Es el tiempo que tarda la materia orgánica en liberar el biogás, depende del tipo de biomasa a digerir y de la temperatura a la cual trabaja el biodigestor. [7, 25].

2.3.2.2. Temperatura de operación. Esta variable está asociada al rango de temperatura al cual se va a trabajar y afecta inversamente al tiempo de retención hidráulico, disminuyendo el volumen a medida que aumenta la temperatura de operación [7, 25].

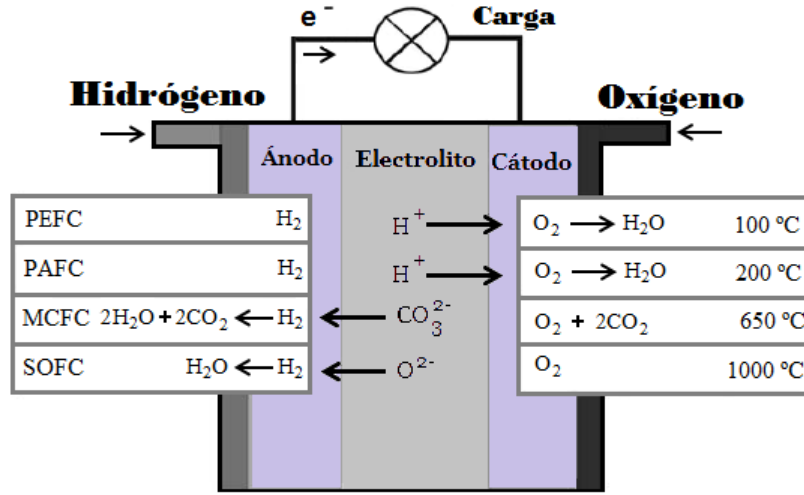
2.3.2.3. Materia prima para la carga. El biodigestor se diseña para almacenar la biomasa que se requiere tratar en función del tiempo de retención hidráulico. Para el caso de un biodigestor continuo, se determina por la cantidad de kilogramos al día que se van a ingresar al biodigestor y el tiempo de retención hidráulico [7].

2.3.2.4. Almacenamiento del biogás. Para almacenar el biogás dentro del digestor, se recomienda prever un 20% del volumen total del biodigestor para esta función [7].

2.4. CELDA DE COMBUSTIBLE

La celda de combustible es un dispositivo electroquímico, el cual convierte energía química directamente en energía eléctrica. Al igual que una batería, la celda de combustible consta de un par de electrodos y un electrolito, la diferencia radica en que la celda de combustible no requiere ser recargada, la producción de energía eléctrica se mantiene mientras que se le suministre combustible (generalmente hidrógeno) y oxígeno. El funcionamiento de la celda de combustible (figura 11) radica en la combinación del hidrógeno con el oxígeno en un proceso libre de combustión, liberando energía eléctrica en una reacción electroquímica [11,14].

Figura 11. Reacción química de acuerdo al tipo de celda de combustible.



Fuente: Adaptado de [11].

Básicamente el hidrógeno es inyectado en el ánodo, en el ánodo el combustible es oxidado, liberando electrones, los cuales viajan a través de un circuito externo. En el cátodo, el oxidante es reducido, consumiendo electrones del circuito externo. Los iones viajan a través del electrolito para balancear el flujo de electrones a través del circuito externo. Las reacciones entre el ánodo y el cátodo y la composición y dirección del flujo de iones móviles varían según el tipo de celda de combustible [11,14].

En la figura 12 se observa una clasificación de las celdas según la potencia y la aplicación y en la figura 13, se muestra un resumen de las reacciones químicas de acuerdo con el tipo de celda de combustible.

Figura 12. Resumen del tipo de celda y la potencia.

Aplicación típica	Vehículos, portátiles y equipos electrónicos			Carros, barcos y Cogeneración doméstica			Generación de energía distribuida, cogeneración, autobuses		
	1	10	100	1k	10k	100k	1M	10M	
Potencia (W)									
Principales ventajas	Mayor densidad de energía que las baterías, recarga más rápido			Potencial de cero emisiones, aumento de la eficiencia			Mayor eficiencia, menos contaminación		
Campo de aplicación de los distintos tipos de FC									

Fuente: Adaptado de [14].

Figura 13. Reacciones químicas según el tipo de celda.

Celda de combustible	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo
Electrolito polimérico (PEMFC) y ácido fosfórico (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alcalina (AFC)	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Carbonatos fundidos (MCFC)	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$
Sólidos de óxido (SOFC)	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$

CO = monóxido de carbono
CO₂ = dióxido de carbono
CO₃⁼ = ión carbonato

e⁻ = electrón
H⁺ = ión hidrógeno
H₂ = hidrógeno

H₂O = agua
O₂ = oxígeno
OH⁻ = ión hidróxido

Fuente: Adaptado de [18].

Dependiendo del electrolito que se utilice para la construcción de las celdas de combustible y su temperatura de operación, las celdas de combustible se pueden clasificar como:

2.4.1. *Phosphoric acid fuel cell (PAFC)*

Celda de combustible de ácido fosfórico, en este tipo de celda se utiliza el ácido fosfórico líquido concentrado H₃PO₄, almacenado en una matriz de carburo de silicio (SiC) reforzada con teflón. La temperatura de operación se encuentra entre

150°C a 200°C. Para trabajar con gas natural o biogás, hay que realizar un proceso de reformado para la obtención del hidrógeno [11, 14, 18].

2.4.2. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)

Celda de membrana de intercambio protónico o de electrolito polimérico, el tipo de electrolito utilizado es una membrana de intercambio iónico (polímero de ácido sulfónico fluoratado o fluorosulfonadas). La membrana es un aislante de los electrones y un excelente conductor de iones de hidrógeno. La temperatura de operación se encuentra entre 50°C a 90°C. Trabaja con H₂ [11, 14, 18].

2.4.3. Solid oxide fuel cell (SOFC)

Celda de combustible de óxido sólido, el electrolito utilizado es una cerámica sólida, un óxido metálico no poroso, usualmente circonio denso (ZrO₂) estabilizado con ytria (Y₂O₃), por lo que no se requiere una matriz para mantener el electrolito. El rango de temperatura de operación se encuentra entre los 800°C a 1000°C. Existe la posibilidad de realizarse un reformado internamente en la celda, debido a la alta temperatura de operación, este tipo de celda es apropiada para operar directamente con biogás, gas natural e incluso combustibles líquidos [11, 14, 18].

2.4.4. Molten carbonate fuel cell (MCFC)

Celda de combustible de carbonatos fundidos. El electrolito es una sal fundida de carbonatos de litio y potasio (LiKCO₃) o una sal alcalina (NaOH), que es retenido en una matriz de cerámica aluminato de litio (LiAlO₂) que es porosa, aislante y químicamente inerte. La temperatura de operación se encuentra entre los 600°C a 700°C [11, 14, 18].

2.5. GAS NATURAL

El gas natural es un combustible compuesto por una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que en su mayor parte está constituida por metano (CH₄) y etano y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e

hidrocarburos más pesados. Se encuentra, al igual que el petróleo, en yacimientos en el subsuelo en uno de los siguientes estados:

- Asociado, cuando está mezclado con el crudo al ser extraído del yacimiento.
- Libre o no asociado, cuando se encuentra en un yacimiento, en el cual sólo contiene gas.

Por lo tanto, su composición, su gravedad específica, su peso molecular y su poder calorífico son diferentes en cada yacimiento.

El gas natural se utiliza como materia prima o como combustible en los sectores industrial, petroquímico, termoeléctrico, doméstico, comercial y de transporte terrestre [13].

2.6. CASOS PREVIOS

Actualmente existen plantas especializadas en la obtención de biogás procedentes de estiércol de res, de cerdo, residuos de comida, residuos sólidos orgánicos urbanos, lodos de tratamiento de aguas residuales, entre otros, con el fin de aprovechar su potencial energético. Algunos estudios y aplicaciones del uso de biomasa residual para suplir necesidades energéticas se muestran a continuación:

- *Biogas Nord*, es una compañía global que construye plantas de biogás en todo el mundo. Fundada en el año 2000 y con sede en Bielefeld, Alemania. Ha construido hasta la fecha más de 240 plantas de biogás en todo el mundo. Los digestores y tanques de almacenamiento construidos por la compañía son contenedores cilíndricos construidos con hormigón reforzado. El biogás es utilizado para la generación de energía eléctrica y térmica en un generador eléctrico. Parte de la energía eléctrica generada se utiliza para cubrir las necesidades energéticas de la propia planta de biogás. El resto se alimenta a la red pública de suministro eléctrico. Algunos ejemplos de plantas instaladas por esta empresa se encuentran en la tabla 1[3].

Tabla 1. Plantas instaladas por *Biogas Nord*.

Ejemplos de plantas instaladas por <i>Biogas Nord</i> .			
Planta y tipo de residuo	Capacidad instalada [kW]	Año	Volumen del biodigestor [m ³]
Tailandia, utiliza residuos sólidos orgánicos urbanos.	2*50	2004	4*1 526
Font du Lac, Wisconsin, USA, estiércol de vaca.	330	2004	2*2 600
Sapadny, Brest. Bielorusia, estiércol de cerdo.	180, 340	2006	1 527, 2 079

Fuente: Adaptado de [3].

- Proyecto piloto finca agropecuaria ROBAGO, desarrollado en Costa Rica, allí se utiliza biogás para la generación de electricidad. En este proyecto se plantean una serie de estrategias basadas en la generación de energía eléctrica, mediante la utilización de biomasa.

La finca objeto del este proyecto piloto posee una extensión de 250 hectáreas, y se dedica principalmente a la producción de ganadería de doble propósito y al engorde de pollos, actividades que se complementan con la producción de caña de azúcar, mango y el engorde de cerdos.

El proyecto consistió en utilizar el estiércol de las vacas lecheras, para producir biogás, el cual fue utilizado para generar energía eléctrica y cubrir parte de las demandas de energía de algunos procesos de la finca. Para tal efecto, se diseñaron dos biodigestores del tipo media bolsa con canal de agua, alimentados diariamente con el estiércol producido por 100 vacas durante las 8 horas de ordeño (560 kg estiércol/día).

Cada biodigestor estaba provisto de un orificio para la salida del biogás, por donde es conducido el gas hasta el motor diesel de 30 kW de potencia, o a una planta de gas licuado de petróleo (GLP) de 25 kW.

Con la energía eléctrica generada a partir de este proceso, se operaron los equipos de ventilación y comederos en los galpones de engorde de pollos, así

como los equipos de lechería durante dos ordeños diarios [6]. En la tabla 2 se presenta un resumen de las características principales del proyecto piloto.

Tabla 2. Resumen de características del proyecto piloto ROBAGO.

Proyecto piloto finca agropecuaria ROBAGO	
Biomasa utilizada, estiércol de vaca [kg/día]	560
Volumen del biodigestor [m ³]	43
Producción de biogás (100 vacas) [m ³ /día]	40
Capacidad de la planta diesel [kW]	30
Consumo promedio de la finca [kWh/mes]	4 300
Generación aproximada con biogás [kWh/mes]	2 000

Fuente: Adaptado de [6].

- *Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno.* Artículo publicado en la revista ingeniería e investigación de la Universidad Nacional de Colombia, desarrollado por Juan M. Mantilla, Carlos A. Duque, Carlos H. Galeano. La capacidad de la planta diseñada procesa el estiércol de 1300 reses, generando 500 kW mediante la operación de un motor generador que funciona con una mezcla de combustible diesel y biogás. El diseño incluyó el dimensionamiento de los establos para el ganado, los sistemas de recolección, transporte y mezcla del estiércol, el digestor, el tanque de efluente y el sistema para el tratamiento del biogás, entre otros elementos, utilizando equipos disponibles en la planta [19]. En la tabla 3 se resumen el tipo de biomasa utilizada, volumen del biodigestor, el volumen de biogás producido al día y el equipo propuesto para la generación de energía eléctrica.

Tabla 3. Resumen de características del diseño planteado en el artículo.

Resumen de características	
Biomasa utilizada: Estiércol de vaca y agua [t/día]	70,4
Volumen del biodigestor [m ³]	1 480
Producción de biogás [m ³ /día]	2 440
Generación de energía eléctrica: Motor <i>DIESEL</i> [kW]	850

Fuente: Adaptado de [19].

- *Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos orgánicos urbanos provenientes de las plazas de mercado y diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia para su aprovechamiento industrial en Colombia*, tesis de pregrado desarrollada en la Universidad Industrial de Santander por Otoniel Sabalza y Oscar Villamizar, dirigida por Ph. D Humberto Escalante. Presenta la evaluación del potencial energético de los residuos sólidos orgánicos urbanos procedentes de las plazas de mercado en las principales ciudades del país [24]. En la tabla 4 se resumen algunas características principales del diseño propuesto, como lo es el tipo de biomasa utilizado, el volumen del biodigestor, la producción diaria de biogás y el equipo propuesto para la generación de energía eléctrica.

Tabla 4. Resumen de características del diseño propuesto en la tesis.

Resumen de características del diseño propuesto	
Biomasa utilizada: Residuos sólidos orgánicos urbanos [t/día]	1
Volumen del biodigestor [m ³]	60
Producción de biogás [kg/h]	34,3
Generación de energía eléctrica: Turbina de vapor [kW]	1 092

Fuente: Adaptado de [24].

- *Celdas de combustible a partir de biogás: caracterización del proceso de generación eléctrica en el sector rural con IDEFO*, es una tesis de pregrado,

realizada en la Universidad Industrial de Santander por Érick E. López y Mario F. Ruiz, dirigido por Ph. D Gilberto Carrillo Caicedo. Este trabajo caracterizó el proceso de generación de energía eléctrica en el sector rural utilizando biogás y celdas de combustible. Expone de manera especial las celdas de combustible tipo *SOFC (Solid Oxid Fuel Cell)*. Este tipo de celda se puede alimentar directamente con biogás, sin la necesidad de realizar un reformado previo, con la ventaja de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero [18]. En el diseño se utiliza estiércol de vaca y estiércol de cerdo. En la tabla 5 se resumen las características principales del diseño, como lo es el tipo de biomasa utilizado, el volumen del biodigestor, la producción diaria de biogás y el equipo propuesto para generación de energía eléctrica.

Tabla 5. Resumen de características del diseño planteado en la tesis.

Resumen de características del diseño propuesto	
Biomasa utilizada: Estiércol de vaca y estiércol de cerdo [kg/día]	167
Volumen del biodigestor [m ³]	15
Producción de biogás [m ³ /día]	23
Generación de energía eléctrica: Celda de combustible tipo <i>SOFC</i> [kW]	5

Fuente: Adaptado de [18].

- *Estudio de factibilidad de uso racional eficiente de la materia prima no tradicional del sector avícola para la generación de energía eléctrica*, es una tesis de pregrado, desarrollada en la Universidad Industrial de Santander por Erick Martínez y dirigida por Ph. D Johann F. Petit, en la que se desarrolla un trabajo investigativo sobre el uso de materias primas renovables, específicamente la pollinaza, para la generación de energía eléctrica en la industria avícola [21]. Las características principales del diseño propuesto se resumen en la tabla 6, como lo es el tipo de biomasa utilizado, el volumen del biodigestor, la producción diaria de biogás y el equipo propuesto para la generación de energía eléctrica.

Tabla 6. Resumen de características del diseño planteado en la tesis.

Resumen de características	
Biomasa utilizada: pollinaza [kg/día]	265
Volumen del biodigestor [m ³]	15
Producción de biogás [m ³ /día]	13
Generación de energía eléctrica: Grupo electrógeno [kW]	5,5

Fuente: Adaptado de [21].

3. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA GENERADA

Para determinar el potencial energético de la biomasa disponible en el Edificio de Bienestar Universitario de la Universidad Industrial de Santander, se tienen en cuenta tres tipos de biomasa, dos de las cuales se generan en el servicio de comedores (residuos de comida y residuos vegetales) y las aguas residuales de los sanitarios de la edificación.

Los residuos de comida y los residuos vegetales, se generan diariamente en la sección de comedores, a partir de la tercera semana del semestre y hasta la última semana de parciales. Estos residuos se depositan diariamente en una caseta de recolección, ubicada en la parte externa del edificio. A partir de un seguimiento realizado a la caseta de recolección (anexo A, anexo B), se estima que al día se generan 167 kg de residuos de las comidas y 46 kg de peladuras de vegetales, en promedio.

En el caso de las aguas residuales, se necesita determinar su caudal de diseño. Para esto se requiere de un programa intensivo de aforos de caudal, ó guiarse por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, el cual plantea los procedimientos necesarios para determinar los caudales y concentraciones de interés sanitario y ambiental de los vertimientos [5].

No es un objetivo de este estudio determinar el dimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la edificación.

La alternativa propuesta para utilizar las aguas residuales, se toma como base la población que frecuenta el edificio de Bienestar Universitario. Se tiene en cuenta el personal que labora de forma regular y estudiantes que acuden a estas instalaciones por servicios médicos y por el servicio de comedores.

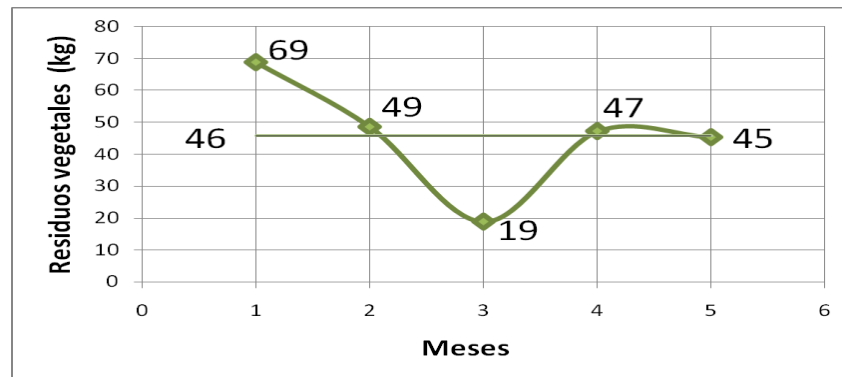
La metodología para obtener el potencial energético almacenado en la biomasa, se fundamenta en la posible producción y poder calorífico inferior del biogás,

teniendo en cuenta cuanto biogás se puede llegar a obtener por kilogramo de sólido volátil (kgSV) [2, 24, 25].

3.1. BIOMASA ANTES DE LA COCCIÓN

Los residuos vegetales que conforman este tipo de biomasa, incluyen peladuras de vegetales utilizados para la preparación de los alimentos, plátano, zanahoria, cebollas, tomate, residuos de ensaladas, etc. La producción de ese tipo de residuo, se encuentra en el orden de los 46 kg - día (figura 14).

Figura 14. Promedio diario del peso de residuos de verdura.



Fuente: El autor.

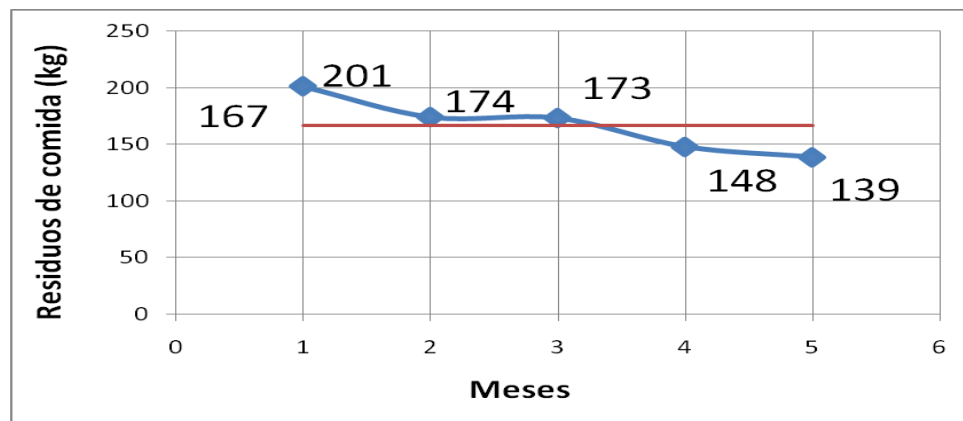
Lo expuesto en [25], los residuos de verdura, cuentan con una posible producción de biogás de $0,350 \text{ m}^3/\text{kgSV}$ y un porcentaje de sólidos volátiles (%SV) de 10,3 %. Otros estudios [2, 26], obtienen producciones de biogás del orden de los $0,382 \text{ m}^3/\text{kgSV}$. Para el presente estudio de factibilidad se toma una producción de biogás de $0,350 \text{ m}^3/\text{kgSV}$ y 10,3%SV [25].

3.2. BIOMASA DESPUÉS DE COCCIÓN

Este tipo de biomasa lo conforman los residuos de las comidas ya preparadas. Estas son depositadas en un compartimiento en la parte externa del servicio de comedores.

La producción de ese tipo de residuo, se encuentra en el orden de los 167 kg - día (figura 15). Teniendo en cuenta los datos suministrados por [25], se tiene una posible producción de biogás de 0,250 m³/kgSV y un porcentaje de sólidos volátiles de 1,5 %SV. En investigaciones realizadas por [10, 17, 27], se obtienen producciones de biogás más elevadas, del orden de los 0,489 m³/kgSV bajo condiciones establecidas de temperatura, tiempo de retención hidráulico, %SV, etc. Para el presente estudio se toma una posible producción de biogás de 0,250 m³/kgSV [14] y el porcentaje de sólidos volátiles en el orden del 26,35 %SV [27].

Figura 15. Promedio diario de residuos de comida.



Fuente: El autor

3.3. AGUAS RESIDUALES

Debido a que no se cuentan con los estudios del caudal de las aguas residuales, necesarios para determinar un diseño, se tiene en cuenta la población que frecuenta la edificación.

En la tabla 7 se especifica una posible producción de biogás en una semana, teniendo en cuenta la cantidad de personas que frecuentan las instalaciones de Bienestar Universitario, el tiempo de permanencia en la edificación y el peso promedio de la persona

Durante el semestre, se presta el servicio de comedores a los estudiantes, desde la tercera o cuarta semana del semestre, hasta el último día de parciales.

Tabla 7. Resumen de la semana tipo.

semana tipo 1	
cantidad de estudiantes que tienen comedores	1900
Tiempo de permanencia en minutos	15
Total minutos	28500
Total horas	475
Total horas equivalentes a un turno	59
Uno de cada dos personas	30
Descargas por hora	3,75
Numero de citas al día	
Odontológicas	40
Medicas	90
Especialistas	5
Tiempo de permanencia en minutos	30
Total minutos	4050
Total horas	68
Total horas equivalentes a un turno de 8 horas	8
Uno de dos personas	5
Descargas por hora	0,625
Número de trabajadores en la edificación	50
turno [h]	8
Uno de dos personas	25
Descargas por hora	3,125
Total de descargas por hora	8
Peso promedio de una persona [kg]	58
Funcionamiento de la edificación [h]	12
Total de descargas al día	90
Peso de las excretas [kg]	52
Sólidos volátiles [kg]	7,8
Producción de biogás [m ³]	2,35

3.4. POSIBLE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La posible producción de biogás se determina sumando la producción de cada tipo de biomasa, según lo recomendando en [25].

Para cada tipo de residuo se tiene que:

$$PG = MPC * \%SV * P \quad (3.1)$$

Donde:

PG, biogás producido en m³ por día.

MPC, peso de la biomasa en kg por día, dependiendo del tipo de biomasa.

%SV, es el porcentaje de sólidos volátiles, de acuerdo al tipo de residuo.

P, es la producción aproximada de m³ de biomasa / 1 kg de sólidos volátiles.

En la tabla 8, se presenta un resumen de la producción de biogás en un día, teniendo en cuenta el tipo de residuo.

Tabla 8. m³ de biogás generados en un día, para cada tipo de residuo.

Volumen de biogás generados en un día.				
Tipo de biomasa	Cantidad [kg]	% SV	m ³ _{biogás} /kgSV	m ³ _{biogás} .
Residuos vegetales.	46	10,30	0,35	1,7
Residuos de comida.	167	26,35	0,25	11
Aguas residuales.	52	15,00	0,30	2,35

Para analizar la posible producción de biogás de la biomasa animal, se estima que cada descarga, se compone de 5 litros de agua y 0,58 kg de materia orgánica [20] (teniendo en cuenta un peso promedio de 58 kg de las personas). Dependiendo del número de descargas al día y la cantidad de materia orgánica, se estima una posible producción de biogás, con base a la cantidad de sólidos volátiles (15 % de según lo recomendado por [25]) presentes en la biomasa. Determinada la cantidad de sólidos volátiles, se tiene un rendimiento de biogás (0,300 m³_{Biogás}/kgSV), obteniendo una posible producción de m³ de biogás al día [25].

Se estima que un día normal durante el semestre, en el edificio de Bienestar Universitario, laboran 50 personas 8 horas al día, se presentan 1900 estudiantes del servicio de comedores, los cuales permanecen en la edificación durante 15 minutos al día, se asignan 135 citas medicas, odontológicas y especialistas, y estos estudiantes permanecen 30 minutos en el edificio. Tomando como consideración que una de cada dos personas que labora 8 horas al día en la edificación, realiza una deposición durante su jornada laboral, se estima la cantidad de turnos equivalentes al tiempo de permanencia de los estudiantes. Es decir, los estudiantes de comedores tienen una equivalencia de 30 turnos, y los estudiantes que van a las citas medicas de 5 turnos.

En la tabla 9 se estima una posible producción de biogás teniendo en cuenta la semana tipo, el número de descargas al día, el peso promedio de la personas, el porcentaje de sólidos volátiles y el rendimiento de biogás.

Tabla 9. Posible producción de biogás en un día.

Descargas al día.	90
Peso promedio de las personas.	58
Peso total descargas [kg].	52
% de SV. [14]	15
Rendimiento de biogás m ³ / kg de SV. [14]	0,300
Posible producción de biogás. [m ³]. [14]	2,35

Lo recomendado por [25], es utilizar el 1% del peso promedio de la persona, como la cantidad de excretas en cada descarga.

Se tiene en cuenta un total de 60 descargas equivalentes, durante 8 horas del turno laboral. Se realiza un ajuste a este valor teniendo en cuenta que el edificio inicia labores antes de las 7 a.m y finaliza después de las 7 p.m. Se toman en total

12 horas, para un total de 90 descargas al día. Además, se estiman de 13 semanas durante el semestre en las cuales se presta el servicio de comedores.

3.5. POTENCIAL ENERGÉTICO

Para calcular el potencial energético de la biomasa, se tiene en cuenta la cantidad de biogás a generar mediante el proceso de digestión anaerobia (tabla 8 y 9). Para el caso de comedores, se cuenta con el servicio, desde la tercera semana del semestre, hasta la última semana de parciales, con lo cual se cuenta con 26 semanas de alimentación del sistema de digestión anaerobia en el año. Durante este periodo se tiene una posible producción de biogás de 1646 m³_{biogás}, con un potencial energético en el orden de los 8 600 kWh. En la tabla 10 y tabla 11, se presenta el resumen del potencial de la biomasa teniendo en cuenta 26 semanas de funcionamiento en el año.

Tabla 10. Potencial energético de los residuos vegetales y de comida.

Potencial energético de residuos de comida y vegetales			
Kg	m ³ de biogás	MJ	kWh
27 700	1 646	31 000	8 600

Para analizar el potencial energético producido por la biomasa animal, se analiza el número de semanas tipo al año y la producción de biogás.

Tabla 11. Potencial energético de las aguas residuales.

Potencial energético las aguas residuales.			
Kg	m ³ de biogás	MJ	kWh
6 790	305	5 740	1 600

3.6. BIOGÁS, GAS NATURAL Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Las equivalencias entre gas natural y biogás, se determinan de acuerdo al poder calorífico de los dos gases. El gas natural tiene un poder calorífico inferior de

38MJ/m³, dependiendo del yacimiento y del porcentaje de metano (CH₄) que lo compone, mientras que para el biogás se tienen un poder calorífico inferior de 18,8MJ/m³, al igual que el gas natural, este potencial depende del porcentaje de metano en su composición, se determina que 2 m³ de biogás, equivale a 1 m³ de gas natural.

4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA A PLANTEAR

Las características técnicas del biodigestor, celda de combustible y sistema de alimentación de biogás para la cocción de alimentos, se relacionan con la cantidad de biomasa generada en la edificación.

Parte de la metodología utilizada en la producción de biogás, se fundamenta en la guía para la implementación de sistemas de producción de biogás, planteada por la Unidad de Planeación Minero Energética. El objetivo de esta guía es proveer de información técnica básica para la implementación y uso de sistemas de producción de biogás en instalaciones agropecuarias en Colombia. Esta guía expone los aspectos técnicos para la producción de biogás, condiciones de diseño, selección y operación de un sistema de biogás [25].

El trabajo realizado en [18], contiene información puntual del uso de biogás para suplir necesidades energéticas utilizando celdas de combustible. La utilización de las celdas de combustible tipo SOFC, para el aprovechamiento del biogás es una alternativa para la generación de energía eléctrica, de tal forma que no se requiera de un reformado previo del biogás. Además se cuenta con una propuesta de diseño de un biodigestor de domo flotante, y una celda biogás tipo SOFC, para la generación de energía eléctrica.

4.1. BIODIGESTOR PARA LOS RESIDUOS DE COMIDA Y RESIDUOS VEGETALES

La metodología utilizada por [25], para el dimensionamiento del digestor tiene en cuenta la cantidad de biomasa disponible, su densidad, el tiempo de retención hidráulico y un factor de sobredimensionamiento, en este caso se toma de 1,5 con el finalidad de no necesitar un reservorio externo para el almacenamiento del biogás.

La producción de biogás podría suplir un porcentaje inferior al 15% de las necesidades energéticas de la edificación, ya que el consumo de gas natural de la

edificación supera los 1800 m³/mes y consumos de potencia activa del orden de 45 kW en algunas horas del día [8].

Se propone un biodigestores de flujo continuo, debido a la frecuencia de generación de residuos y de domo fijo, debido a que no se deteriora rápidamente como el biodigestor tipo balón y requiere menor mantenimiento y costos comparado con un biodigestor de domo flotante [25].

4.1.1. Variables asociadas al dimensionamiento

Una de las variables fundamentales en el digestor es su volumen, el cual depende de la cantidad de biomasa, la densidad de la mezcla, el tiempo de retención y un factor de sobre dimensionamiento.

$$V_{BR} = \frac{M_{PG}}{\rho} * t_R * f_{VBR} \quad (4.1)$$

Donde:

V_{BR} es el volumen del biodigestor en m³.

M_{PG} es la materia prima para la carga en kg/día.

ρ es la densidad de la materia prima para la carga en kg/m³.

t_R es el tiempo de retención hidráulico en días.

f_{VBR} es el factor de sobredimensionamiento para almacenamiento del biogás, en este caso se toma de 1,5.

De la ecuación 4.1, el volumen del biodigestor es aproximadamente de 13,3 m³, dato con a partir del cual determinan la altura, el largo y el ancho del biodigestor. Se recomienda que la altura sea igual al ancho y el largo del biodigestor sea el doble de la altura [11].

4.1.2. Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo necesario para que la materia orgánica, una vez que entra el digestor, se someta al proceso de descomposición

anaerobia [5]. El tiempo de retención, con base a los estudios realizados por [10, 17, 27] se estima en 45 días.

4.1.3 Materia orgánica para la carga diaria

Teniendo en cuenta el inventario realizado durante el segundo semestre del 2009, se estima un producción diaria de 167 kg de residuos de comida y 46 kg de peladuras de plátano, cebolla, tomate, yuca, zanahoria, los cuales se depositan en la caseta de recolección (figura 16).

Figura 16. Caseta de recolección de los residuos de comedores.



Fuente: El autor

En la caseta se depositan los residuos de las comidas en un tanque de 55 galones y los residuos vegetales en bolsas (figura 17).

Figura 17. Interior de la caseta de alimentación.



Fuente: El autor

Se propone colocar el tanque de alimentación del biodigestor en la parte superior de la caseta de recolección y el biodigestor bajo el nivel de la caseta. Se recomienda triturar la biomasa antes de colocarla en la cámara de alimentación del biodigestor. Triturada la biomasa, se deposita en la cámara de alimentación ingresando al biodigestor por acción de la gravedad (figura 18).

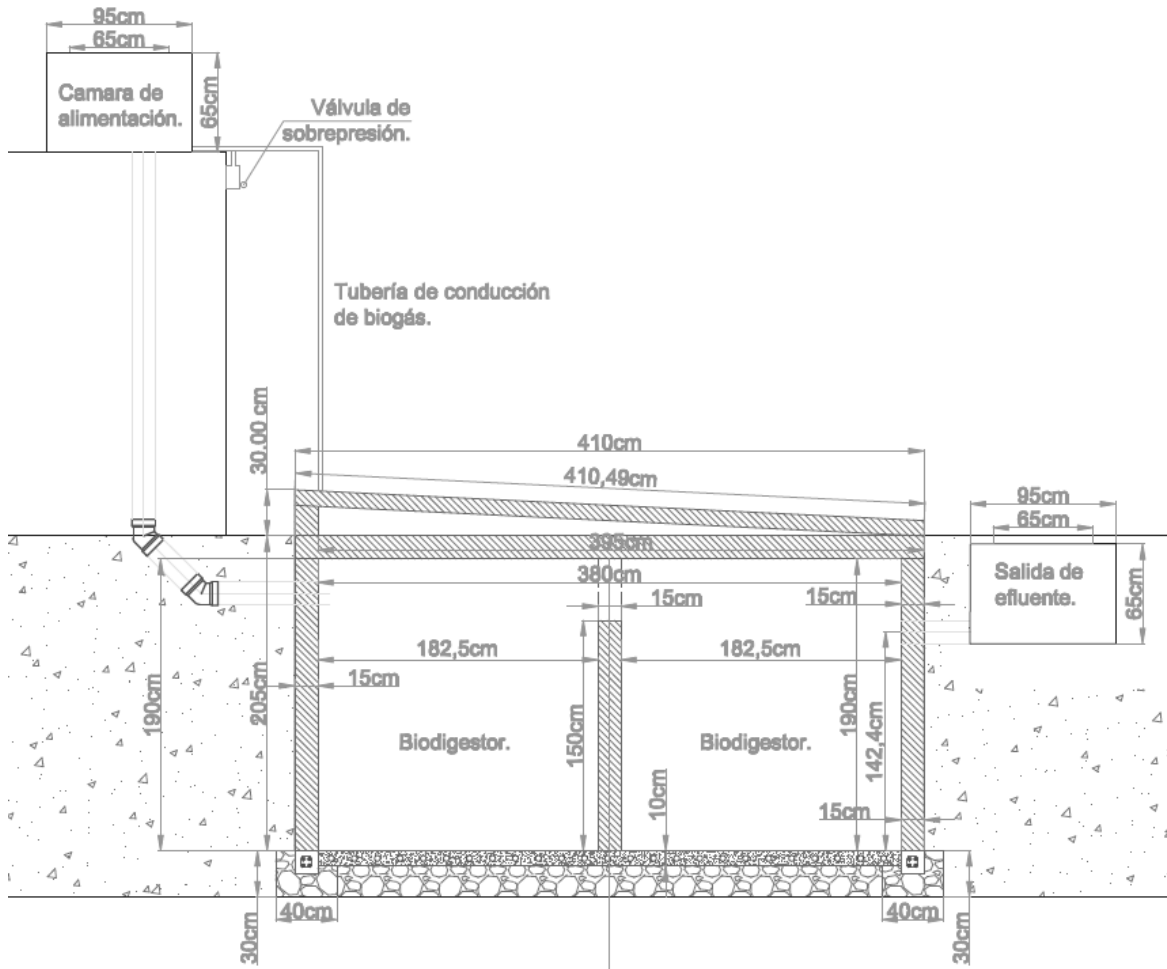
En la tabla 12 se resumen de las características técnicas del biodigestor, como la temperatura de operación, el tiempo de retención hidráulico, el número de cargas al día, la densidad de la materia orgánica, volumen, etc.

En el interior del biodigestor (figura 18), la altura y el ancho son de 1,9 [m] y el largo es de 3,8 [m], para un volumen de almacenamiento de 13,3 [m³] (teniendo en cuenta el volumen que ocupa la división interna).

Tabla 12. Resumen de las características del biodigestor para trabajar con los residuos de comedores.

Biodigestor para los residuos de comedores	
Temperatura de operación [°C]	21
Tiempo de retención hidráulico [días]	45
Cargas al día	1
Densidad [kg/m ³]	1083
Peso de cada carga [kg]	213
Factor de sobredimensionamiento	1,5
Volumen [m ³]	13,3

Figura 18. Biodigestor propuesto para los residuos vegetales y de comida.



Fuente: El autor.

4.2. BIODIGESTOR PARA LAS AGUAS RESIDUALES

La proporción entre la materia orgánica y agua que debe entrar al biodigestor por cada descarga se recomienda que sea uno a uno [20], para lo cual se requiere de un sistema que permita garantizar esa proporción y el exceso de agua se envíe directamente al sistema de tratamiento de aguas residuales. La cantidad de agua en cada descarga esta en el orden de 5 litros [20], es necesario realizar estudios para determinar un sistema que permita disminuir la cantidad de agua que entra al biodigestor.

Garantizando la proporción 1 a 1 para alimentar el biodigestor, las características técnicas del biodigestor se resumen en la tabla 13.

En el interior del biodigestor (figura 19), la altura y el ancho son de 1,6 [m] y el largo es de 3,2 [m], para un volumen de almacenamiento de 8 [m³] (teniendo en cuenta el volumen que ocupa la división interna).

Tabla 13. Resumen de las características del biodigestor para trabajar con las aguas residuales.

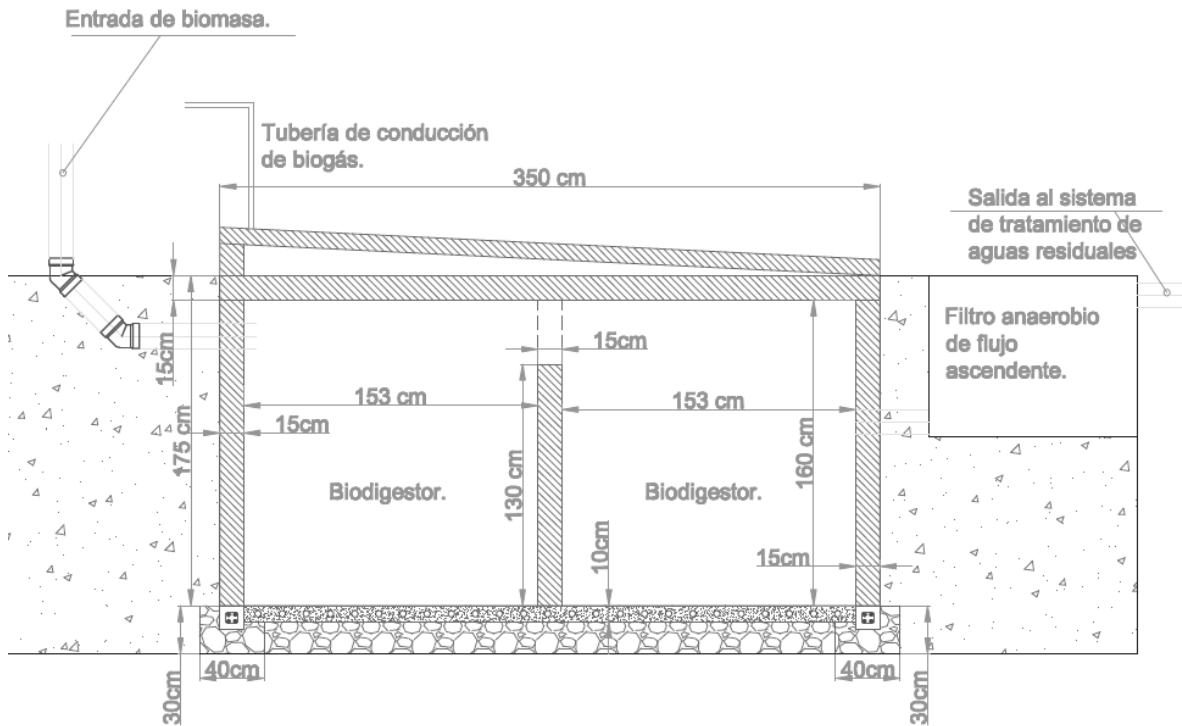
Biodigestor para las aguas residuales	
Temperatura de operación [°C]	21
Tiempo de retención hidráulico [días]	51
Descargas por día	90
Densidad [kg/m ³]	1000
Peso de cada descarga [kg]	1,16
Factor de sobredimensionamiento	1,5
Volumen [m ³]	8

Hay que tener en cuenta la necesidad de colocar un filtro para el efluente sale del biodigestor. Para esta labor se propone utilizar un filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), el cual se compone de una tanque plástico de 1000 litros y en su interior se utiliza piedra de rio de 3 a 4 pulgadas de diámetro como material filtrante, la cual hay se cambiarla cada año y medio. Otra opción es comprar un material filtrante comercial, con la ventaja de requerir un cambio a los 7 años de servicio.

El agua filtrada, puede ser enviada al sistema de tratamiento de aguas residuales, además, se deben realizar estudios de laboratorio para determinar el fin último de este efluente.

En la figura 19 se detalla el biodigestor propuesto para aguas residuales.

Figura 19. Biodigestor propuesto para las aguas residuales.



Fuente: El autor.

4.3. RECOMENDACIONES PARA DETERMINAR LA CARGA A ALIMENTAR

Según lo expuesto en [23], se recomienda realizar una discriminación de la carga que va a ser alimentada por la celda de combustible o el grupo electrógeno, además es necesario conocer la demanda de potencia y corriente que será suministrada, para lo cual es necesario un estudio que refleje las condiciones reales de operación de la carga. Realizar este análisis permite contar con herramientas para determinar la carga que se le asigna al sistema de generación a partir de biogás.

Teniendo en cuenta que el sistema no puede suplir la totalidad de la energía eléctrica necesaria en la edificación, se cree conveniente alimentar solo cargas de iluminación.

Se recomienda que la carga se alimente por el grupo electrógeno o por la celda de combustible, se realice de manera aislada a la red de suministro. Teniendo en cuenta que la carga a alimentar es de iluminación, se realiza una conmutación manual en el caso que no opere el sistema de generación por medio de biogás, se alimente por medio de la red externa.

4.4. CELDA DE COMBUSTIBLE

La celda de combustible más apropiada para el aprovechamiento de biogás es la celda de óxido sólido (SOFC), debido a sus componentes utilizados en su construcción y a la temperatura de operación, la cual se encuentra en el orden de 800°C a 1000°C, permite trabajar con el biogás sin necesidad de reformado antes de inyectarlo a la celda de combustible. Existen tres formas de reformado del biogás, las cuales requieren temperaturas de operación superiores a los 800°C.

La celda de combustible SOFC-5000, propuesta en [18], es una celda de combustible con una potencia de 5 kW, salida trifásica tetrafilar, 208/120 V, 50 o 60 Hz. El consumo de gas a máxima potencia es de 2,8 m³/h a máxima potencia, con lo cual, a máxima potencia la celda trabajaría al día 5 horas (teniendo en cuenta una producción de 15 m³ por al día).

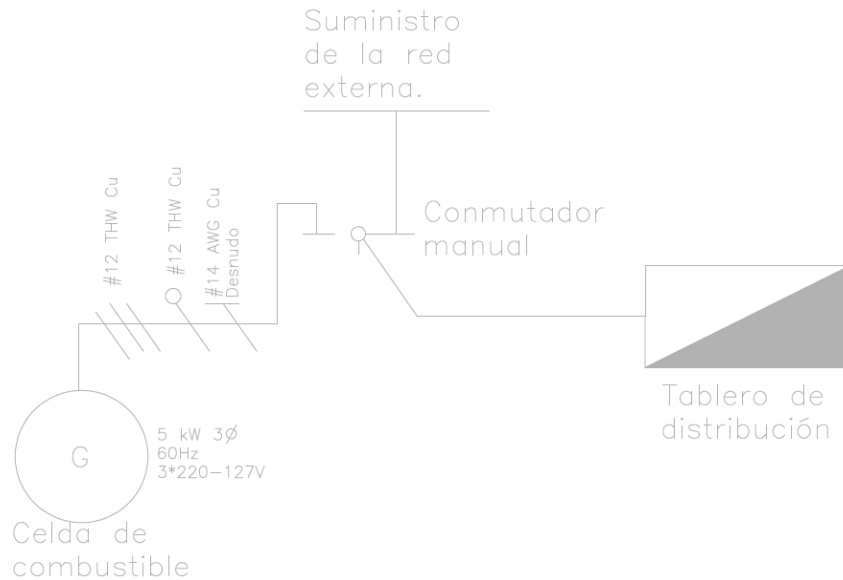
Las características técnicas de la celda de combustible son:

- Potencia de salida: 5kW/5kVA.
- Tensión de salida: 208/120 VAC trifásica tetrafilar.
- Sobrecarga (3 s): 21 A.
- Presión de entrada 0,25 a 0,5 psi.
- Inspeccionar y limpiar el filtro de aire cada año.
- Sustituir cada 9000 horas el filtro de azufre.
- Largo 1,72 m, ancho 0,91 m, alto 0,85 m.
- Instalación adecuada al aire libre, puertas extraíbles.

- Peso menor a 545 kg.
- Altitud 0-1524 m.

En la figura 20 se muestra el circuito unifilar:

Figura 20. Circuito unifilar utilizando celda de combustible.



Fuente: El autor

4.5. EQUIPO ELECTRÓGENO

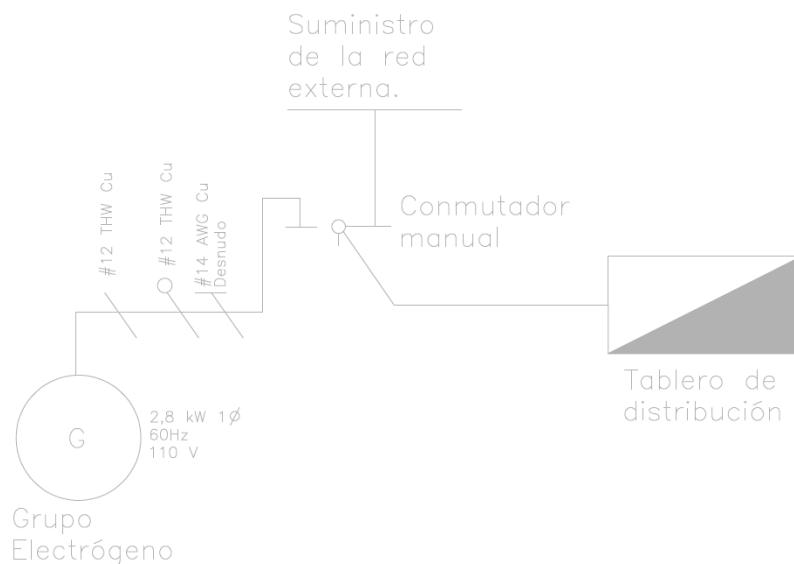
Otra alternativa para la generación de energía eléctrica es la utilización de un grupo electrógeno [21], el combustible utilizado puede ser gasolina, gas natural, A.C.P.M., etc. Al equipo se realizan las adaptaciones correspondientes para trabajar con biogás. Existen otras opciones para trabajar directamente con biogás. El equipo seleccionado es un grupo electrógeno DF3500EBG, de 3 kW, salida 110 V, 60 Hz. Teniendo en cuenta el consumo del grupo electrógeno, de 1,96 m³/h (0,7m³/kWh*2,8kWh), y una producción de biogás de 15 m³, se estima un tiempo de funcionamiento de 7,65 h (15m³/1,96m³/h) al día.

Las principales características son:

- Potencia de salida: 2,8 kW.
- Tensión de salida: 110/220.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Combustible: Biogás.
- Consumo de gas: 0,7 m³/kWh.
- Nivel de ruido a 7 metros (db): 65.
- Dimensiones (largo, ancho y alto) (cm): 70 - 52,5 - 56.

En la figura 21 se muestra el circuito unifilar utilizando el grupo electrógeno.

Figura 21. Circuito unifilar utilizando grupo electrógeno.



Fuente: El autor.

4.6. COCCIÓN DE ALIMENTOS

Las diferencias entre el biogás y el gas natural utilizado en la cocción de alimentos, radican en el porcentaje de metano presente en los dos tipos de gases, en el caso del biogás se puede encontrar de un 55% a un 70% de metano, mientras que el porcentaje de metano presente en el gas natural es superior al 95% dependiendo del yacimiento.

Teniendo en cuenta la posible producción de biogás, comparada con el consumo de gas natural, se recomienda acondicionar un quemador exclusivo para el biogás. Algunos consumos asociados a los quemadores se observa en la tabla 14, se recomienda utilizar un quemador grande de dos puestos exclusivamente para utilizar el biogás sin llegar a mezclarlo con el gas natural [15].

Tabla 14. Consumo de los quemadores.

Consumo de biogás de algunos quemadores.		
Tipo de quemador	MJ/h	M ³ _{Biogás} /h
Pequeño	4,184 a 5,23	0,22 a 0,28
Mediano	6,3 a 7,3	0,33 a 0,39
Grande	Mínimo 8,4	0,44

Fuente: Adaptado de [15].

5. ANÁLISIS FINANCIERO

Para el desarrollo del análisis financiero, se tiene en cuenta los costos asociados a cada una de las alternativas (generación de energía eléctrica y cocción de alimentos), el costo de los mantenimientos y los ahorros generados en el consumo de energía eléctrica y gas natural, se determina el valor presente neto y la tasa interna de retorno, para un tiempo de vida útil del proyecto de 20 años [25].

El costo de los servicios del kWh y el m³ de gas natural, se resumen en la tabla 15, con base a los recibos de energía eléctrica y gas natural.

Tabla 15. Precio del kWh y el m³ de gas natural.

Costo de los servicios	
Servicio	Costos [\$]
Energía eléctrica [kWh]	367
Gas natural [m ³]	793

Teniendo en cuenta el potencial energético de la biomasa, se cuantifican los ahorros generados en energía eléctrica (tabla 16) y en gas natural (tabla 17).

Tabla 16. Ahorro generado en energía eléctrica al año, utilizando la celda de combustible o el grupo electrógeno.

Equipo	Eficiencia [%]	Ahorro anual [\$]
Celda de combustible	40	1'500 000
Grupo electrógeno	27,3	1'024 000

Tabla 17. Ahorro generado utilizando biogás en reemplazo del gas natural.

[m ³] de biogás	[m ³] de gas natural	Ahorro generado
1 951	967	766 600

Los costos asociados al biodigestor, celda de combustible, equipo electrógeno, mano de obra, se resumen en la tabla 18.

Tabla 18. Costos de los equipos.

Costos de los equipos	
Equipo	Costo
Biodigestor 13,3 [m ³]	\$2'070 000
Biodigestor de 8 [m ³]	\$1'535 150
Filtro anaerobio de flujo ascendente	\$1'100 000
Accesorios	\$550 000
Celda de combustible 3 Kw	\$14'000 000
Grupo electrógeno 3 kW	\$1'000 000
Conmutador manual	\$130 000
Quemador de biogás	\$320 000
Triturador de basuras	\$2'000 000
Mano de obra	\$7'333 000
Utilidad, administración e imprevistos 20%	
Celda de combustible.	\$5'745 700
Equipo electrógeno.	\$3'145 700
Quemador de biogás.	\$2'983 700
Costo de cada una de las opciones	
Celda de combustible.	\$34'474 200
Equipo electrógeno.	\$18'874 200
Quemador de biogás.	\$17'902 200

Teniendo en cuenta el costo total del sistema y de los ahorros generados, se comparan las dos alternativas, generación de energía eléctrica (celda de combustible, grupo electrógeno) y la cocción de alimentos. En el anexo C se especifican los costos asociados a los materiales para la construcción de los biodigestores.

Para poder realizar el cálculo del valor presente neto, se tiene en cuenta el ahorro generado en energía eléctrica y gas natural, los costos asociados al

mantenimiento del biodigestor (cada dos años), celda de combustible y grupo electrógeno, el recambio cada 7 años del filtro anaerobio de flujo ascendente, el cambio de los equipos.

Los costos asociados a cada una de las actividades se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Costo asociado a las actividades de mantenimiento.

Actividad	Costo
Mantenimiento del biodigestor. (Cada dos años.)	\$300 000
Mantenimiento del sistema de generación.	\$150 000
Trituración de la biomasa. (5 días a la semana, 26 semanas al año.)	\$23 900
Mantenimiento del filtro FAFA (cada 7 años)	\$400 000

En la figura 22 se muestra el comportamiento del valor presente neto de las opciones al variar la tasa de descuento, con un tiempo de vida útil del proyecto de 20 años [21], trabajando 26 semanas al año y 5 días a la semana, en la cual el VPN y la TIR son negativos. En la tabla 20 se resumen de la TIR y del VPN para cada una de las alternativas.

Figura 22. Comportamiento del VPN con diferentes tasas de descuento.

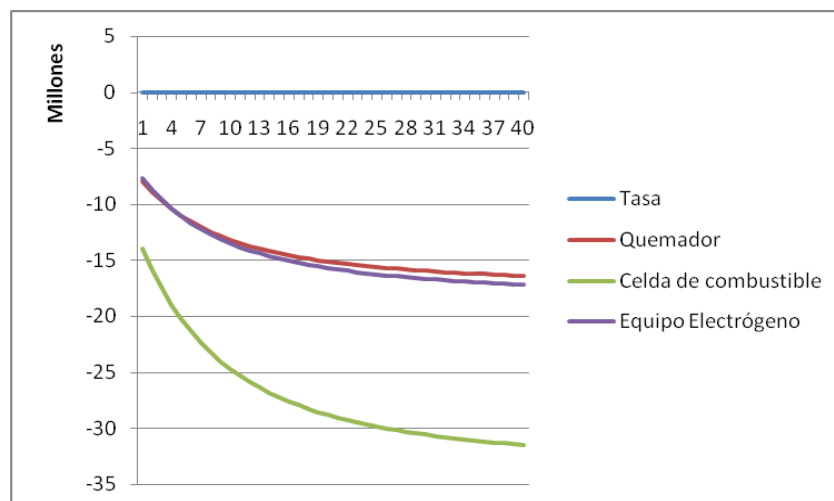


Tabla 20. TIR y VPN para cada una de las opciones.

Equipo	TIR %	VPN[\$] 1%
Celda de combustible	-3,69	-13'968 000
Grupo electrógeno	-3,74	-7'718 400
Quemador de biogás	-4,15	-7'957 900

CONCLUSIONES

- Con este trabajo se evaluó una opción para el aprovechamiento de los residuos generados por la sección de comedores, siendo esta una tarea necesaria a corto plazo para disminuir el impacto negativo ocasionado al medioambiente, al trasladar estos residuos fuera de la universidad.
- Se determinó una posible producción de biogás utilizando la biomasa generada en el servicio de comedores y las aguas residuales, el cual puede estar en el orden de los 15 m³/día.
- Con base en la posible producción de biogás, se determinó el potencial energético de la biomasa generada en el servicio de comedores, cercano a los 8 600 kWh al año, y sumando el biogás de las aguas residuales, un potencial cercano a los 10 200 kWh al año.
- Utilizando la posible producción de biogás de los residuos vegetales, de comida y las aguas residuales., exclusivamente para la generación de energía eléctrica, se generan ahorros anuales de \$1'500 000 utilizando solo celda de combustible, de \$1'024 000 utilizando solo equipo electrógeno.
- Utilizando la posible producción de biogás solo para la cocción de alimentos, se generan ahorros anuales de \$766 600, utilizando los residuos vegetales, de comida y las aguas residuales.

RECOMENDACIONES

Para el biodigestor alimentado con los residuos de las comidas y los residuos vegetales, se recomienda realizar pruebas de laboratorio, que determinen la presencia de patógenos, de esta forma determinar el tipo de proceso para aprovecharlo como abono orgánico.

Las celdas de combustible tipo SOFC, debido a su alta temperatura, requieren de un tiempo de encendido, el cual puede tomar hasta media hora. Para su conexión a la red del edificio de bienestar, es necesario realizar los estudios de la carga que se va a suplir y contar con un sistema de conmutación, con el fin de no operar la celda de combustible en paralelo a la red eléctrica de suministro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BESEL, S.A., Departamento de Energía. Biomasa, digestores anaerobios [online]. Instituto de diversificación y ahorro de la energía. [Madrid, España] Febrero, 2007 [citado 22 abril 2010; 18:12:00]. Disponible en internet: http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
- [2] BHATTACHARYA, S.C, y SALAM, P. Abdul y RUNQING, H.U. y SOMASHEKAR, H.I., y RACELIS, D.A., y RATHNASIRI, P.G. y YINGYUAD, R. *An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010*.En: Biomass and Bioenergy 29, 2005, p. 153-166.
- [3] *Biogas Nord*, Tecnología y procesado [online]. [Werningshof, Alemania] 2010 [citado 27 de septiembre de 2010; 9:15:00]. Disponible en internet: <http://www.biogas-nord.com/lang-es/tecnologia>.
- [4] CALERO, Roque y CARTA, José A. y PADRÓN, José M. Tecnologías energéticas específicas [online]. Gobierno de Canarias, Febrero, 2007 [citado 7 mayo de 2010; 8:25:35] Disponible en internet: <http://rcalero.aferventus.biz/energia/contenidos/docpdf/capitulo18.pdf>.
- [5] CALVO, Julio Cesar y TORRES, Andrey Fernando. Diseños alternativos de sistemas de tratamiento de aguas residuales para poblaciones menores a cincuenta mil habitantes. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Civil. 2010. 146 p.
- [6] CAÑAS, Irene y VÍQUEZ, Miguel. Utilización de biogás para la generación de electricidad [online]. Centro Nacional de Planificación Eléctrica [Costa Rica] 2004 [citado 3 agosto 2010; 16:25:00] Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/biogas.pdf>
- [7] CARRILLO, Leonor. Microbiología agrícola [online]. Universidad Nacional de Salta, 2003. [Citado 6 octubre de 2010; 10:25:00]. Disponible en internet: <http://www.unsa.edu.ar/matbib/micragri/micagricap5.pdf>

- [8] CASTRO, Camilo Alonso y GÓMEZ, Oscar David y PISCIOTTI, Mitchel Stevenson. Estudio y rediseño de las instalaciones eléctricas de los edificios de Bienestar Universitario, Ingeniería Mecánica y la Perla. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2008. 239 p.
- [9] CHAMY, Rolando y VIVANCO, Elba. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la producción de biogás [online]. Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (GNE/ GTZ) [Santiago, Chile] 2007 [citado 16 de abril; 14:15:02] Disponible en internet: <http://www.gtz.de/de/dokumente/sp-chilepotencial-biogas.pdf>
- [10] CHO, J.K. y PARK, S.C. *Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes*. En: Bioresource. Technology, 52 (1995), p. 245-253.
- [11] DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER, Angelika. *Biogas from waste and renewable resources*. 1 ed. Weinheim: WILEY-VCH. 2008. 472 p.
- [12] Diccionario de la lengua española vigésima segunda edición.
- [13] Ecopetrol S.A. Catálogo de productos: Gas natural [online]. [Citado Jueves, 14 de agosto de 2010; 16:25:00]. Disponible en internet: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=210&conID=36624>
- [14] FARRET, Felix y SIMOES, Marcelo. *Integration of alternative source of energy*. 1 ed. Hoboken NJ: Wiley-IEEE Press, 2006. 504 p.
- [15] GROPELLI, E.S y GIAMPAOLI, O.A. El camino de la biodigestión. Universidad Nacional del Litoral, tercera edición, 2007.
- [16] KAYHANIAN, Massoud, TCHOBANOGLOUS, George y BROWN, Robert C. *Biomass Conversion Processes For Energy Recovery*. En: KREITH, Frank y GOSWAMI, Yogi. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Boca Raton: CRC press, 2007. p. 25-1, 25-51.

- [17] LEE, D H y BEHERA, S. K. y KIM, J. y PARK, H. S. *Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study*. En: Waste Management 29 (2009), p. 876-882.
- [18] LÓPEZ, Erick Emmanuel y RUIZ, Mario Fernando. Celdas de combustible a partir de biogás: caracterización del proceso de generación eléctrica en el sector rural con IDEFO. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2008. 242 p.
- [19] MANTILLA, Juan Miguel y DUQUE, Carlos Alberto y GALEANO, Carlos Humberto. Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. En: Ingeniería e Investigación, Diciembre, 2007 vol. 27 N^o.3, p133-142.
- [20] MARTÍ, Jaime. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación [online]. Programa de desarrollo agropecuario PROAGRO [Bolivia 2008]. [Citado 2 septiembre 2010, 10:12:00]. Disponible en internet: http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/10bib_arch.pdf
- [21] MARTÍNEZ, Erick. Estudio de factibilidad de uso racional eficiente de la materia prima no tradicional del sector avícola para la generación de energía eléctrica. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2009. 80 p.
- [22] RODRÍGUEZ, Jenny. Tratamiento anaerobio de aguas residuales [online]. Universidad del Valle [Cali, Colombia]. [citado 8 de octubre de 2010; 14:16:00]. Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/tratamiento.pdf>
- [23] ROMERO, Fabián José y MARTÍNEZ, José Alberto. Mantenimiento de las plantas eléctricas de emergencia de la Universidad Industrial de Santander, selección de inventario, caracterización y protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2009. 158 p.

- [24] SABALZA, Otoniel y VILLAMIZAR, Oscar Alonso. Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos orgánicos urbanos provenientes de las plazas de mercado y diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia para su aprovechamiento industrial en Colombia. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2009. 89 p.
- [25] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01, versión 1, Bogotá D.C, ICONTEC-AENE, 2003, p. 47.
- [26] VEREDA, C. y GÓMEZ, C. y GARCÍA, F. y RODRÍGUEZ, J.M. Producción de biogás a partir de residuos vegetales (I). En: Ingeniería Química. Febrero, 2006 N° 432, p. 114-122.
- [27] ZHANG, R. y EL-MASHAD, H. M. y HARTMAN, K. y WANG, F. y LIU, G. y CHOATE, C. y GAMBLE, P. *Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion.* En: Bioresource Technology 98 (2007), p. 929-935.

ANEXOS

ANEXO A: INVENTARIO RESIDUOS VEGETALES Y RESIDUOS DE COMIDA

A continuación se muestran los días en los cuales se realizó el seguimiento a la caseta de recolección. Generalmente se realizaba la observación entre las 11:15 a.m y las 12:30 p.m. y en las horas de la noche a las 6:30 p.m. En muchas ocasiones la recolección de los residuos ya se había realizado antes de tomar los datos ó la caseta se encontraba cerrada. En las tablas se encuentra el día que se realizo la observación, si fue durante el día y noche, que tanto porcentaje del tanque se encontraba lleno y el numero de bolsas presentes.

Noviembre 2009			
Día	Hora	% tanque	Bolsas
18	Día	100	8
19	Día	100	3
20	Día	100	1
24	Día	100	5
25	Día	100	2
26	Día	100	12
31	Día	30	3

Diciembre 2009			
Día	Hora	% tanque	Bolsas
1	Día	100	3
2	Día	100	6
3	Día	100	2
4	Día	95	1
7	Día	30	2
9	Día	80	4

Enero 2010			
Día	Hora	% tanque	Bolsas
21	Noche	95	0
22	Día	95	2
	Noche	80	0
25	Día	60	2
27	Día	60	2
28	Día	55	2
29	Día	20	0

Febrero 2010			
Día	Hora	% tanque	Bolsas
4	Día	100	4
11	Día	85	2
12	Día	100	1
15	Día	20	2
17	Día	0	2
18	Día	100	5
22	Día	20	3
23	Día	70	5
25	Día	100	6

Marzo 2010			
Día	Hora	% tanque	Bolsas
2	Día	65	3
3	Día	60	2
5	Día	70	3
8	Día	25	3
	Noche	0	3
23	Noche	90	2

Con base a esta información se toma un promedio diario del tanque lleno de 74,85% y un promedio diario de 3,3 bolsas.

ANEXO B: DETERMINACION DEL PESO DE LA BIOMASA

Para determinar el peso del tanque de recolección de 55 galones y de las bolsas se realizaron mediciones durante tres días. Para determinar el peso del tanque, se pesó un galón de la biomasa en su interior y se pesaron las bolsas con los residuos vegetales presentes en la caseta. Las mediciones realizadas de la biomasa presente en el tanque de recolección se resumen en la siguiente la tabla, en la cual se especifica el día de la medición, el peso de un galón de biomasa, el peso del tanque completamente lleno y el peso promedio del tanque según los días que se realizaron las mediciones en el anexo A:

Tanque de recolección de 55 galones	
Día de la medición	Peso [kg]
Miércoles 2 de Diciembre 2009	4,03
Jueves 3 de Diciembre 2009	4,06
Viernes 4 de Diciembre 2009	4,09
Peso promedio	4,06
Peso del tanque lleno	223, 3
Peso promedio del tanque (74,85% lleno)	167,2

El peso de las bolsas en promedio de las bolsas se determino pesando las bolsas presentes en la caseta de recolección, se pesaron una a una y se determinó un peso promedio. En la siguiente tabla se resumen los resultados de las mediciones, y el peso promedio de las bolsas según el inventario en el anexo A.

Peso de las bolsas	kg
Miércoles 2 de Diciembre	14,3
	14,4
	14,8
	10,3
	16,9
	10,0
Jueves 3 de Diciembre	12,4
	20,4
Viernes 4 de Diciembre	14,1
Promedio	14,15
Peso de 3,3 bolsas al día:	46,6

ANEXO C: COSTO DE LOS BIODIGESTORES

Para la construcción del biodigestor se utiliza ladrillo, cemento, arena, triturado, varilla de acero, etc. Estos materiales se consiguen localmente y se han cotizado en ferreterías de la ciudad. En la siguiente tabla se resumen los costos asociados al biodigestor para los residuos de comida y vegetales.

Costo asociado al biodigestor para los residuos vegetales y de comida			
Material	Cantidad	Precio por unidad	Precio total
Agregado fino [m ³]	2	\$24 200	\$48 400
Agregado grueso [m ³]	2	\$33 700	\$67 400
Cemento 50 [kg]	44	\$15 900	\$699 600
Varilla N3 de 6 m de largo	31	\$ 5 900	\$182 900
Varilla N5 de 6 m de largo	35	\$15 000	\$525 000
Ladrillo	405	\$1 350	\$546 750
Total			\$2'070 000

En la siguiente tabla se resumen los costos asociados al biodigestor propuesto para trabajar con las aguas residuales.

Costo asociado al biodigestor para las aguas residuales			
Material	Cantidad	Precio por unidad	Precio total
Agregado fino [m ³]	1	\$ 24 200	\$ 24 200
Agregado grueso [m ³]	2	\$ 33 700	\$ 67 400
Cemento 50 [kg]	33	\$ 15 900	\$ 524 700
Varilla N3 de 6 m de largo	29	\$ 5 900	\$ 171 100
Varilla N5 de 6 m de largo	26	\$ 15 000	\$ 390 000
Ladrillo	265	\$ 1 350	\$ 357 750
Total			\$ 1'535 150