



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES E  
INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Sistema biodigestor para el tratamiento de  
desechos orgánicos  
(Estelí, Nicaragua)**

AUTOR: Alejandro Bautista Buhigas  
TUTOR: Antonio Aznar Jiménez

**LEGANÉS, Octubre 2010**





## **Resumen**

El tratamiento de los desechos orgánicos procedentes de la agroindustria tales como el despulpado del café (pulpa y aguas mieles), la cáscara del plátano, sueros de leche producidos por las queserías y la gallinaza (estiércol de gallina preparado para ser utilizado como abono o complemento alimenticio para ganado); constituye una valiosa oportunidad de evitar la contaminación de los acuíferos, reducir la deforestación, obtener energía proveniente del biogás y producir fertilizantes orgánicos.

Este es un proyecto realizado en el ámbito de la cooperación al desarrollo, cuyo objetivo es la construcción de un biodigestor y la creación de una metodología que permita la replicación de dicha tecnología, a través de un convenio entre la Universidad Carlos III de Madrid, la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM-Estelí) y la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).

El proyecto se centra en dos líneas; una parte experimental y otra orientada a la práctica constructiva de tres biodigestores portátiles para su uso como herramienta docente en la universidad. La parte experimental consistirá en los análisis de la digestión dentro de los tres biodigestores portátiles con el fin de caracterizar la biodigestión de cada uno de los desechos orgánicos anteriormente citados. En la parte práctica, la idea central es proponer un sistema biodigestor en el Parque Científico Estelimar cuyo diseño estará basado sobre los resultados experimentales, considerando, por supuesto, las condiciones de terreno, disponibilidad de agua y otros recursos locales de la finca.

## **Palabras claves**

Biodigestor; Digestión Anaeróbica; Biogás; Pulpa Café; Agua miel; Banana; Plátano; Suero leche; Gallinaza; Abono.

## **Abstract**

The treatment of the organic waste such as the waste produced by coffee pulping (pulp and coffee wastewater), banana skin, whey produced by cheese makers and chicken manure (prepared to be used as fertilizer or as a nutritious complement for livestock); represents a valuable opportunity for preventing the contamination of aquifers, decreasing deforestation, obtaining energy resulting from biogas and producing organic fertilizer.

This is a project carried out in the Development Cooperation field, with the objective of the construction of an anaerobic digester and the development of a methodology that will enable the replication of this technology. The project is actualized through an agreement between the following Universities: Universidad Carlos III de Madrid, the Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM-Estelí) and Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).

The project focuses on two research lines; one experimental and the other directed at the constructive practice of three portable anaerobic digesters to be used as an educative aid in the university. The experimental component will consist of the analysis of the digestion inside of each one of three portable anaerobic digesters with the purpose of defining the digestion of each one of the organic waste aforementioned. The practical component proposes the implementation of an anaerobic digestion system for Parque Científico Estelimar; depending on the results of the experimental component such the course of the environmental conditions, water availability and the local resources.

## **Key words**

Anaerobic digester; Biogas; Coffee Pulp; Coffee wastewater; Banana; Whey; Chicken Manure; Fertilizer.



**Universidad de Carlos III**  
**Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua)**

## **Relación entre Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) y Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN)**

Debido a que en este estudio se nombran muchos organismos, asociaciones o instituciones con sus siglas, se ha creído conveniente realizar un listado de los mismos a modo de inventario, para recurrir a él en caso de duda.

Ambas universidades forman parte de la Red Universitaria de Apoyo a la Alfabetización de Nicaragua con el método "Yo, Sí Puedo", constituida en las I Jornadas que se organizaron en la UdG el 21 y 22 de febrero de 2007.

Forman parte de la Red 16 Universidades españolas y 11 nicaragüenses, así como dos instituciones docentes, la Asociación de Educación Popular Carlos Fonseca Amador – AEPCFA y el Instituto Paulo Freire de España – IPF. La Red obtuvo una ayuda por valor de 40.000 Euros de la Convocatoria 2007 del Programa de Cooperación Interuniversitaria (PCI) de la AECID, ayuda que fue gestionada por la UdG como universidad coordinadora La Red. La Red Yo Sí Puedo cuenta también con el Apoyo del *Fons Català de Cooperació al Desenvolupament*, que ha permitido llevar a cabo las primeras iniciativas de definición de la Red y diseño de objetivos.

La Universidad, a través de la Oficina de Cooperación Universitaria al desarrollo y del Grupo de Tecnologías Apropriadas de Leganés, que lidera junto con la UNI y la UNAN-Managua los trabajos en el área de energías de la Red, participó en julio de 2007 en la II Asamblea de la Red en Managua, Nicaragua. Asimismo, ha aportado ayuda para la construcción del Museo de la Alfabetización que se inauguró el pasado agosto de 2007, contando con el apoyo de las Delegaciones de Estudiantes de la UC3M, que donaron los beneficios del Torneo de Mus celebrado en abril de 2007, y del SIJA, que también donó los beneficios de la fiesta de la primavera a este Museo.

En la convocatoria 2007 del Programa de Cooperación Interuniversitaria (PCI), se obtuvo una ayuda por valor de 10.000 Euros para el proyecto "Taller de apoyo a la investigación en energías renovables para el desarrollo rural sostenible en Universidades de Nicaragua", que se ha desarrollado a lo largo de 2008 con la UNAN y la UNI.

En junio de 2008 se celebró la III Asamblea de la Red en Girona, en la que se renovó el compromiso de la Red para cooperar en la



**Universidad de Carlos III**  
**Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua)**

alfabetización y postalfabetización de la RAAN con el “Yo, sí Puedo”, el “Yo, sí Puedo seguir” y en el desarrollo integral de esa región. Asimismo, se modificó la composición de la Comisión ejecutiva y las líneas de trabajo de la Red, y se adoptó la decisión de celebrar la IV Asamblea de la Red en la sede de la Universidad de URACCAN en Bilwi Kamla-Puerto Cabezas, RAAN, en julio de 2009.

*Acuerdo Marco de Cooperación Académica entre la Universidad Carlos III de Madrid y la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), firmado el 15 de septiembre de 2003*







## Índice

1. <a href="#">Introducción</a> .....	12
1.1. <a href="#">Motivación</a> .....	12
1.2. <a href="#">Objetivos específicos</a> .....	13
1.3. <a href="#">Objetivos generales</a> .....	13
2. <a href="#">Generalidades</a> .....	15
2.1. <a href="#">Energías renovables</a> .....	15
2.2. <a href="#">Digestión anaerobia</a> .....	18
2.2.1. <a href="#">Etapas</a>	
2.2.1.1. <a href="#">Etapa hidrolítica</a> .....	19
2.2.1.2. <a href="#">Etapa acidogénica</a> .....	19
2.2.1.3. <a href="#">Etapa acetogénica</a> .....	19
2.2.1.4. <a href="#">Etapa metanogénica</a> .....	19
2.2.2. <a href="#">Parámetros</a> .....	19
2.2.2.1. <a href="#">Temperatura y tiempo de retención</a> .....	20
2.2.2.2. <a href="#">Valor de pH</a> .....	22
2.2.2.3. <a href="#">Factor de mezclado</a> .....	23
2.2.2.4. <a href="#">Ácidos volátiles</a> .....	23
2.2.2.5. <a href="#">Agentes promotores e inhibidores</a> .....	23
2.2.3. <a href="#">Productos finales</a> .....	24
2.2.3.1. <a href="#">Producción de biogás</a> .....	24
2.2.3.2. <a href="#">Efluentes</a> .....	25
2.2.4. <a href="#">Usos del biogás</a> .....	27
2.3. <a href="#">Tipos de biodigestores</a> .....	31
2.3.1. <a href="#">Pozos sépticos</a> .....	31
2.3.2. <a href="#">Domo flotante (India)</a> .....	32
2.3.3. <a href="#">Domo fijo (China)</a> .....	33
2.3.4. <a href="#">Estructura flexible</a> .....	34
2.3.5. <a href="#">Digestor flotante</a> .....	35
2.3.6. <a href="#">Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno</a> .....	35

2.3.7.	<a href="#"><u>Digestor de alta velocidad o flujo inducido.....</u></a>	<a href="#"><u>36</u></a>
2.3.8.	<a href="#"><u>Instalaciones industriales.....</u></a>	<a href="#"><u>37</u></a>
2.4.	<a href="#"><u>Regímenes de alimentación.....</u></a>	<a href="#"><u>39</u></a>
2.4.1.	<a href="#"><u>Lote o discontinuo (Batch).....</u></a>	<a href="#"><u>39</u></a>
2.4.2.	<a href="#"><u>Lote alimentado o semicontinuo (Fed-Batch).....</u></a>	<a href="#"><u>39</u></a>
2.4.3.	<a href="#"><u>Continuo.....</u></a>	<a href="#"><u>39</u></a>
3.	<a href="#"><u>Desarrollo del trabajo.....</u></a>	<a href="#"><u>40</u></a>
3.1.	<a href="#"><u>Investigación bibliográfica.....</u></a>	<a href="#"><u>40</u></a>
3.2.	<a href="#"><u>Plan de trabajo.....</u></a>	<a href="#"><u>41</u></a>
3.3.	<a href="#"><u>Parte práctica.....</u></a>	<a href="#"><u>42</u></a>
3.4.	<a href="#"><u>Parte experimental.....</u></a>	<a href="#"><u>49</u></a>
4.	<a href="#"><u>Conclusiones.....</u></a>	<a href="#"><u>60</u></a>
5.	<a href="#"><u>Bibliografía.....</u></a>	<a href="#"><u>62</u></a>
6.	<a href="#"><u>Anexo de figuras, tablas y gráficos .....</u></a>	<a href="#"><u>64</u></a>



**Universidad de Carlos III**  
**Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua)**

## **1. INTRODUCCIÓN:**

La energía constituye un insumo clave y básico para el desarrollo de cualquier comunidad, pero cuando hablamos de energía también hablamos de otros aspectos tales como: uso y abuso, fuentes de abastecimiento, contaminación generada por la misma, etc.

Por otro lado al hablar de medio ambiente indudablemente se deben mencionar la generación de residuos, en todos los estados físicos (sólidos, líquidos y gaseosos) y el daño que causa en la sociedad, tanto su presencia, como los productos de su descomposición o los gastos generados por su disposición adecuada.

Este proyecto está basado en la responsabilidad ambiental dentro de la agroindustria por dos razones, contribuir a mejorar la problemática medioambiental relacionada con el uso de energías no renovables y la otra razón es el aprovechamiento de residuos y efluentes para producir energía, transformando así un problema grave de contaminación en un recurso provechoso y limpio (en términos medioambientales) denominado energía de la biomasa

La biomasa tiene múltiples clasificaciones pero la que nos interesa mencionar es la biomasa residual húmeda, que en ausencia de oxígeno es descompuesta por agentes bacteriológicos generándose un gas de alto poder calorífico denominado biogás y otros residuos aprovechables como abono. El biogás está compuesto por al menos un 50% de metano el cual tiene un poder calorífico de 23MJ (5,500Kcal) por cada metro cubico de gas.

Este trabajo tiene como fin realizar un estudio técnico y práctico sobre cómo poder aprovechar distintos residuos procedentes de la agroindustria en el ámbito de la cooperación al desarrollo. Dicho estudio fue posible gracias a un convenio entre la Universidad Carlos III de Madrid, la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM-Estelí) y la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).

### **1.1. Motivación**

Mi trabajo comenzó a mediados de octubre de 2009 y finalizó en julio de 2010. Los primeros meses fueron dedicados al estudio de la abundante documentación, por otro lado necesaria para realizar el trabajo. Dicho



proyecto se encuentra en constante evolución ya que siempre se podrán analizar diferentes residuos para obtener la eficacia de cada uno de ellos.

El aprovechamiento de los recursos energéticos locales, el uso eficiente de la energía eléctrica y la disminución de los agentes ambientales contaminantes contribuyen a la preservación del medio ambiente y al aprovechamiento de los recursos renovables y no renovables de manera responsable.

La experiencia en el tratamiento de los residuos de la agroindustria en Nicaragua no es reciente, en la actualidad ya existe diversos casos de aplicaciones para el aprovechamiento del biogás. Aunque inicialmente este proyecto tuviera como finalidad el estudio y construcción de un biodigestor para los residuos de una finca cafetalera, ha acabado queriendo presentar una ayuda docente a la FAREM Estelí gracias a la construcción de tres biodigestores adaptados para su uso en prácticas de laboratorio; los estudios derivados del uso de dichos biodigestores con pulpa de café, agua miel, cáscara de plátano, suero de leche y gallinaza; y la construcción de un biodigestor en el parque científico de Estelí (Estelimar) para su uso como herramienta docente.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Construcción de tres biodigestores portátiles para su uso docente en prácticas de laboratorio
- Capacitar estudiantes de la carrera de Energías Renovables
- Construcción de un biodigestor en el parque científico de la ciudad
- Investigación con distintos residuos agroindustriales

### **1.3. Objetivos generales**

- Contribuir al desarrollo sostenible de la zona
- Paliar la degradación del suelo
- Evitar contaminación y agotamiento de los acuíferos
- Reducir la deforestación
- Reciclar los residuos orgánicos

- Obtener energía proveniente del biogás
- Obtener fertilizantes orgánicos (bioabono)



## 2. GENERALIDADES:

### 2.1. Energías renovables:

Las energías renovables nos ofrecen tres ventajas si las comparamos con los combustibles fósiles. La primera de ellas, es que son virtualmente inagotables (el petróleo es limitado al igual que el sol pero al menos éste último durará más que la Tierra). La segunda es que no son contaminantes (si estamos hablando de energías renovables limpias, excluyendo entonces a la incineración de la biomasa como energía renovable, lo que puede generar un debate interesante y polémico). La tercera ventaja es su facilidad de deslocalización.

Cuando nos referimos a que las energías renovables son virtualmente inagotables queremos decir que son energías que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, no consumen recursos finitos, y causan menos impactos medioambientales que los combustibles tradicionales. Entre ellas destacan: hidroeléctrica, solar, geotérmica, eólica, biomasa, biogás, etc. Si se une el hecho de que la población mundial va en aumento, la tendencia es consumir cada vez más energía, lo que implica un mayor impacto sobre el medio ambiente.

Por otro lado, la energía procedente de la biomasa no es realmente inagotable, aun siendo renovable. Su uso solamente puede hacerse en casos limitados. Existen dudas sobre la capacidad de la agricultura para proporcionar las cantidades de masa vegetal necesaria si esta fuente se populariza, lo que se está demostrando con el aumento de los precios de los cereales debido a su aprovechamiento para la producción de biocombustibles y el debate ético y moral que esto conlleva. Además, todos los biocombustibles producen mayor cantidad de dióxido de carbono por unidad de energía producida que sus equivalentes fósiles (*Fuente: Estudios sobre inconvenientes de las energías renovables encontrados en internet; por ejemplo [www.biodisol.com](http://www.biodisol.com)*)

Respecto a la limpieza de las energías renovables hay que decir que todas las fuentes de energía producen algún grado de impacto ambiental. La energía geotérmica puede ser muy nociva si se arrastran metales pesados y gases de efecto invernadero a la superficie; la eólica produce impacto visual en el paisaje, ruido de baja frecuencia y puede ser una trampa para aves. La hidráulica menos agresiva es la minihidráulica ya que las grandes presas provocan pérdida de biodiversidad, generan metano por la materia vegetal no retirada, provocan pandemias como fiebre amarilla y dengue en particular en climas templados y climas cálidos, crean obstáculos para la emigración de ciertas especies de peces (en ríos del noroeste de Norteamérica que desembocan en el océano pacífico, se redujo la población de salmones drásticamente) y aumentan la salinidad de los cauces fluviales. La energía solar se encuentra entre las menos agresivas salvo el debate generado por la energía fotovoltaica respecto a que se utiliza gran cantidad de energía para producir los paneles fotovoltaicos y tarda bastante tiempo en amortizarse esa cantidad de energía. La mareomotriz se ha discontinuado por los altísimos costos iniciales y el impacto ambiental que suponen. La energía de las olas junto con la energía de las corrientes marinas habitualmente tienen bajo impacto ambiental ya que usualmente se ubican en costas agrestes. La energía de la biomasa produce contaminación durante la combustión por emisión de CO<sub>2</sub> que puede ser reabsorbida por el crecimiento de las plantas.

Al analizar la tercera ventaja nos podemos encontrar con un debate más político que tecnológico. ¿Qué significa facilidad de deslocalización? No cualquiera tiene petróleo debajo de casa y sin embargo, cualquiera podría tener una placa fotovoltaica o un pequeño aerogenerador en el tejado de su casa.

Esta posibilidad podría suponer, si se promoviera una apuesta por la descentralización de las energías renovables, una descentralización del poder. Sin ninguna duda, los recursos energéticos tienen una relación directa con la economía en el mundo en el que vivimos. Drásticamente se puede decir que el control de la energía supone poder. En la actualidad, una buena parte de los conflictos armados y situaciones de inestabilidad política no se entienden sin analizar el factor energético (el petróleo en Oriente





Medio, el gas en el conflicto entre Rusia y Georgia, el uranio para la producción de energía nuclear en Níger, por citar sólo unos pocos ejemplos).

Sin embargo, parece que la apuesta de las economías occidentales (gobiernos y empresas multinacionales) no camina por la senda de la descentralización, sino por la concentración en grandes parques eólicos y solares (con los impactos medioambientales que estas instalaciones acarrearán). Acercar la producción de la energía a los consumidores significaría acercar una buena cuota de poder a las personas.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es el investigar sobre distintas maneras de obtención de biogás a partir de distintos desechos producidos por la agroindustria, gestionando todos los recursos intervinientes de una manera local. El proceso de la digestión anaeróbica se puede desarrollar tanto a pequeña como a gran escala, siendo ésta última en la que nos centraremos más detalladamente. Además, otro requisito en la elaboración de este trabajo es la aplicación de tecnologías apropiadas a la realidad de la zona donde se ejecute y la utilización de materiales de bajo coste.

Las fuentes de energías renovables en la actualidad representan un 20% del consumo mundial de electricidad, siendo el 90% de origen hidráulico. El resto es muy marginal: biomasa 5,5%, geotérmica 1,5%, eólica 0,5% y solar 0,05%

Alrededor de un 80% de las necesidades de energía en las sociedades industriales occidentales se centran en torno a la industria, la calefacción, la climatización de los edificios y el transporte (coches, trenes, aviones). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones a gran escala de la energía renovable se concentra en la producción de electricidad

En España, las renovables fueron responsables del 19,8 % de la producción eléctrica. La generación de electricidad con energías renovables superó en el año 2007 a la de origen nuclear.

## 2.2. Digestión anaerobia:

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo a través del cual, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en biogás o gas biológico, formado principalmente por metano y anhídrido carbónico. Se caracteriza por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo diversas poblaciones de bacterias. La figura adjunta describe cada una de las fases.

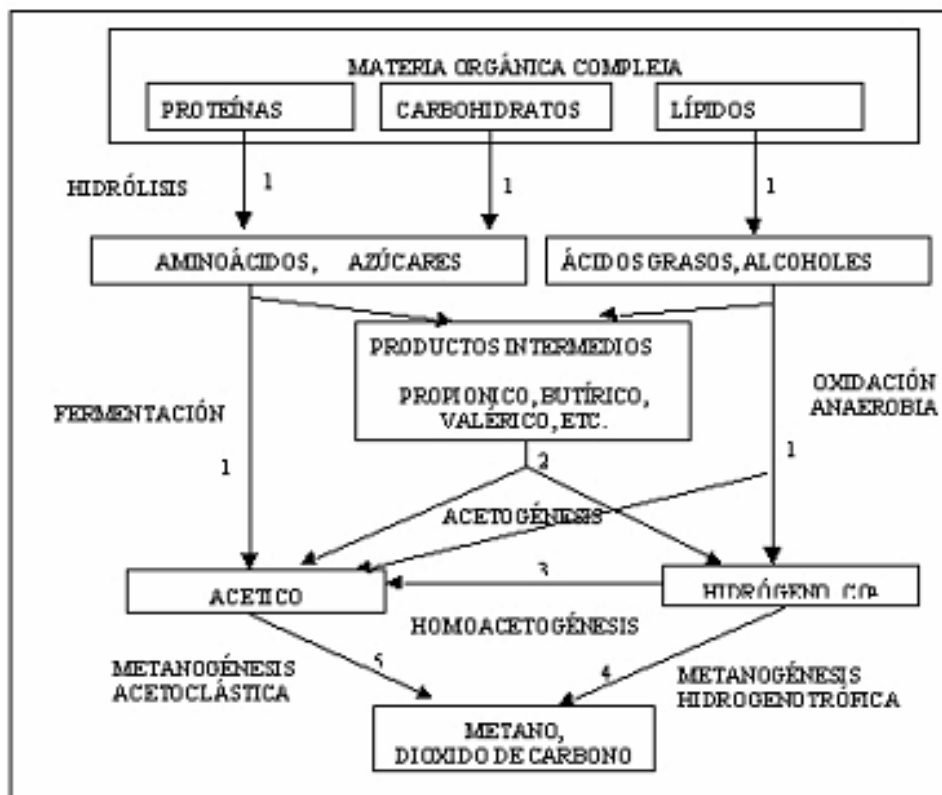


Fig. 1: Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas;  
1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) bacterias acetogénicas;  
3) bacterias homoacetogénicas; 4) bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5) bacterias metanogénicas acetoclásticas (Pavlosthatz, Giraldo-Gómez, 1991)

Se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo 4 etapas, las cuales se describen a continuación:



### 2.2.1. Etapas:

#### 2.2.1.1. Etapa hidrolítica:

Los compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son despolimerizados, por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, etc.

#### 2.2.1.2. Etapa acidogénica:

Los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), esto es, ácidos acéticos, propiónico, butírico y valérico, principalmente.

#### 2.2.1.3. Etapa acetogénica:

Los compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtiene ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono. El metabolismo acetogénico es muy dependiente de las concentraciones de estos productos.

#### 2.2.1.4. Etapa metanogénica:

Constituye la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético hidrogeno y dióxido de carbono son transformados a  $CH_4$  y  $CO_2$ . Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que consumen hidrogeno (metanogénicas hidrogenófilas). La principal vía de formación del metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido, de forma general.

### 2.2.2. Parámetros:

Siendo la digestión anaerobia un proceso bioquímico complejo, es necesario mantener las condiciones óptimas que permitan la realización tanto de las reacciones químicas dentro de la matriz líquida del reactor, como las reacciones bioquímicas intracelulares que dan vida a los organismos en juego.

### 2.2.2.1. Temperatura y tiempo de retención:

La temperatura determina el tiempo de retención para la digestión y degradación de la materia orgánica dentro del digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de la temperatura de trabajo, además se incrementa la producción de biogás. Puesto que la digestión es un proceso tan lento, con frecuencia es necesario aplicar calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas. La mayoría de los digestores convencionales funcionan en la gama mesofílica, es decir, entre 12 y 35° C, optimizándose el proceso entre los 29 y 33°C. Aunque la digestión anaerobia puede ocurrir en la gama termofílica de entre 37-65 °C, con un óptimo en las proximidades de los 55°C, de tal manera que la digestión termofílica permite una permanencia menor en los tanques, pero, debido a su excepcional sensibilidad a los cambios de temperatura, exige un gran control y no es aconsejable.

Es preferible por tanto, la digestión mesofílica, con temperatura controlada.

A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias quedan 'dormidas' y ya no producen biogás. Por ello es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor.

Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

En la figura siguiente se puede ver la curva de composición del biogás de un biodigestor de estiércol de cerdo, como era de esperar esta es inicialmente CO<sub>2</sub>, debido a que en los procesos de acidogénesis y acetogénesis se genera este gas en niveles superiores al del CH<sub>4</sub>, y va



disminuyendo a medida que el acetato y el CO<sub>2</sub> se van transformando en metano (metanogénesis).

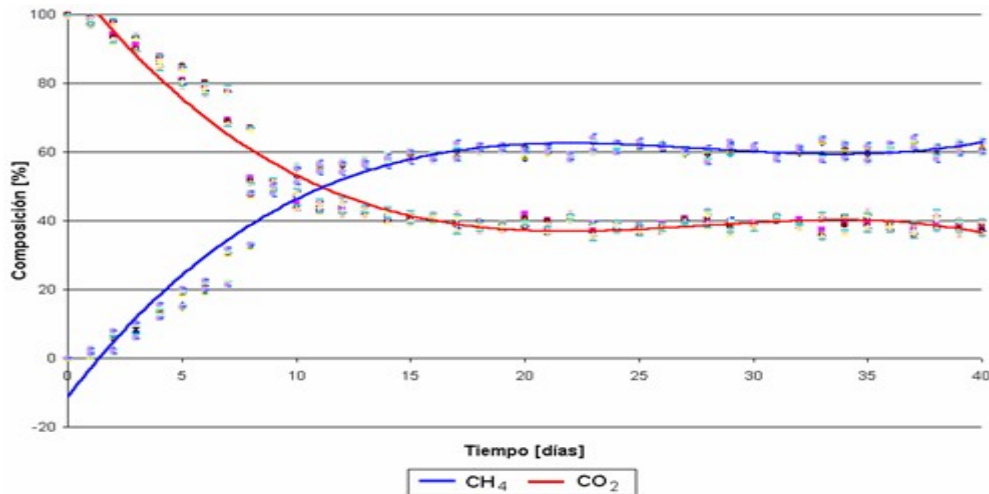


Fig. 2: Composición porcentual de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás

Adicionalmente se puede observar qué sucedía con este tipo de digestor cuando la carga se realizaba después de un tiempo de retención de 40 días.

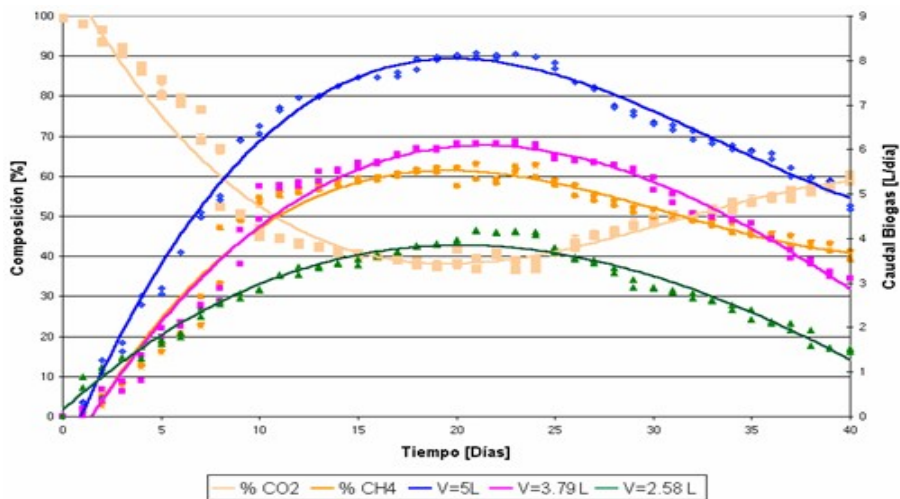


Fig. 3: Producción y composición del biogás para un digestor con tiempo de retención igual a 40 días

En este caso la producción tuvo su máximo valor entre los días 21 y 24, para luego disminuir entre los días 23 y 25, confirmando el concepto de tiempo máximo de retención, el cual es inversamente proporcional a la temperatura interna del digestor. Estas curvas se vuelven importantes

cuando se tienen digestores que trabajan en modo "batch" (Batch: de "Batch Feeding". Alimentación del digester por lotes, se carga una sola vez y se descarga cuando la producción de biogás es muy baja), ya que se puede saber cuál va a ser la producción de biogás en un periodo de tiempo determinado. También se puede ver en esta gráfica la composición del biogás, la cual llega a un valor tope de  $\text{CH}_4$  y disminuye a la par con la producción, aumentando los niveles de  $\text{CO}_2$  en la mezcla volviéndola progresivamente ácida lo cual es debido a la pérdida del equilibrio entre las bacterias al no existir carga fresca.

#### 2.2.2.2. Valor de pH:

El pH representa el grado de acidez presente en el biodigestor , su valor óptimo oscila entre 6,6 y 7,6 cuyo rango es el adecuado para que el reactor opere correctamente, valores de pH por debajo de 5 y por encima de 8 se corre el riesgo de inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo.

Los organismos que intervienen en cada frase son diferentes, y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión, para que ambos tipos de organismos puedan coexistir dentro del digester y encuentren las posibilidades ambientales para su desarrollo.

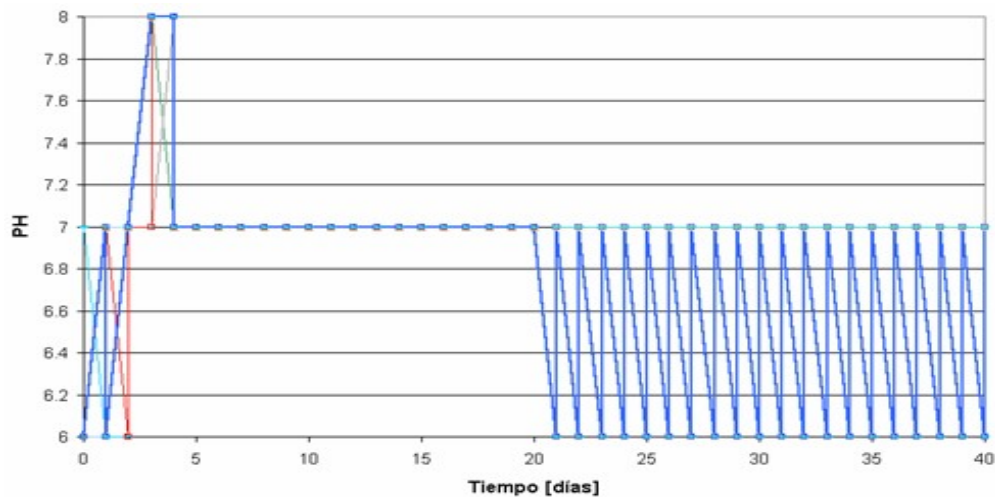


Fig. 4: Mediciones de pH dentro del digester y el efluente

Como se observa en esta figura, durante los primeros días de funcionamiento el digester tiene un comportamiento variable y nada predecible, sin embargo el patrón presentado es: una etapa ácida (pH=6),



seguida de una etapa básica ( $\text{pH}=8$ ), para luego estabilizarse en un valor neutro ( $\text{pH}=7$ ). Es necesario decir que los tres procesos ocurren siempre simultáneamente, sin embargo al inicio es más evidente la influencia de cada uno de ellos.

Los valores de  $\text{pH}$  pueden ser corregidos para mantenerlo dentro del rango adecuado para el proceso de fermentación, cuando el  $\text{pH}$  es alto se puede sacar frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregar materia orgánica fresca en la misma cantidad o bien, Cuando el  $\text{pH}$  es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas, agua amoniacal diluida.

#### **2.2.2.3. El factor de mezclado:**

Las instalaciones de digestión convencionales consistían exclusivamente en un depósito de fangos cerrado a la atmósfera. En él se producía una estratificación que de abajo hacia arriba se puede interpretar de la siguiente manera: fango digerido, fango de digestión, sobrenadante, capa de espumas y gases de digestión.

Al desarrollarse el proceso y llegar a la denominada digestión de alta carga, se estableció que era fundamental que el contenido del digestor fuera mezclado completamente de una forma más o menos continua. Con ello, se conseguía reducir sustancialmente el tiempo de digestión.

#### **2.2.2.4. Ácidos volátiles:**

La concentración de ácidos volátiles, producto de fermentación, tiene una gran importancia en el proceso de la digestión, pues puede llegar a acidificar el fango provocando el fallo del proceso.

El aumento de la concentración de ácidos volátiles puede venir producido por sobrecarga de alimentación, o por una inhibición de las metanobacterias. A su vez, una gran concentración puede provocar la rotura de la capacidad tampón del fango, disminución del  $\text{pH}$  y, en consecuencia, inhibición de las bacterias formadoras de metano.

#### **2.2.2.5. Agentes promotores e inhibidores de la fermentación:**

Los agentes promotores son materiales que fomentan la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de biogás, entre ellos

existen enzimas, sales inorgánicas, se puede emplear urea para acelerar la producción de metano y la degradación del material, Carbonato de Calcio para la generación de gas y para aumentar el contenido de metano en el gas.

Concentraciones elevadas de amoníaco y nitrógeno, sales minerales como los iones metálicos y algunas sustancias orgánicas como detergentes, desinfectantes y químicos agrícolas, que aparte del oxígeno, inhiben la digestión por que destruyen las bacterias metanogénicas.

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO4	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/l
Cu	100mg/l
Cr	200mg./l
Ni	200- 500 mg./l
CN	25mg./mg./l
Detergente sintético	20-40 mg./l
Na	3500-5500 mg./l
K	2500-4500 mg./l
Ca	2500-4500 mg./l
1000-1500 mg./l	1000-1500 mg./l

Tabla 1: Concentración inhibidora de inhibidores comunes (Fuente FAO 1986)

Aparte de la inhibición a causa de los ácidos, la fase metanogénica es inhibida por varias sustancias tóxicas. Éstos incluyen los metales pesados, el cadmio, el cobre, el cromo, el níquel, el plomo y el zinc

### 2.2.3.Productos finales

El biogás y el efluente estabilizado son los principales productos de la digestión anaeróbica.

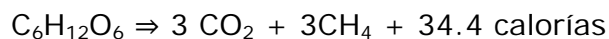
#### 2.2.3.1. Producción de biogás:

El denominado biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el metano (55-65%) y el anhídrido carbónico (35-45%) y en menor proporción, nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%),





oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un microorganismo.



El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia volátil destruida, según sean las características del fango.

El biogás del digestor (debido al metano) posee un poder calorífico aproximado de 4,500 a 5,600 Kcal/m<sup>3</sup>. El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (8,500 Kcal/m<sup>3</sup>), pudiéndose aumentar eliminando todo o parte del CO<sub>2</sub> presente en el biogás. La producción total de gas depende fundamentalmente de la cantidad de alimento consumido por las bacterias o, dicho de otra forma, de la cantidad de sustrato eliminado en el proceso.

#### **2.2.3.2. Efluentes:**

Además de generar gas combustible, la fermentación anaerobia de la materia orgánica produce un residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes (fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio), evitando en esta forma la competencia que se podría presentar con el aprovechamiento tradicional de los residuos animales y agrícolas con fines fertilizantes o como combustibles. La composición del bioabono en promedio tiene 8.5% de materia orgánica, 2.6% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.0% de potasio y un pH de 7.5 (Botero y Thomas, 1987). En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta.

El bioabono sólido o líquido no posee mal olor, a diferencia del estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida, en las cantidades recomendadas (McCaskey, 1990); o bien, el bioabono sólido puede deshidratarse y almacenarse para usarlo posteriormente teniendo en cuenta que al deshidratarse puede haber pérdidas por volatilización de hasta 60%, sobre todo de nitrógeno (Day, 1987). De acuerdo con Mandujano (1981), un metro cúbico de bioabono producido y aplicado diariamente, puede fertilizar más de 2 ha de tierra por año y proporcionar hasta 200 kg N ha<sup>-1</sup> de los que estarán disponibles en el primer año entre 60 y 70 kg. El bioabono no deja residuos tóxicos en el suelo, eleva la calidad del mismo y puede considerarse como un buen fertilizante que puede competir o complementarse con los fertilizantes químicos.

### **Ventajas de los biodigestores y biofertilizante**

- Se optimiza el material orgánico utilizado, ya que se captan todos los productos y subproductos (gases y líquidos con sólidos disueltos) generados en la degradación, por lo cual existe poca pérdida de elementos nutritivos, cosa que no sucede en la biodegradación aerobia.

- Los residuos orgánicos obtenidos después de la biodegradación anaerobia (efluente) tienen mayor riqueza nutricional que los obtenidos en la biodegradación aerobia (Noyola y Monroy, 1994).

### **Desventajas de los biodigestores y biofertilizante**

- El material orgánico obtenido de este tipo de biodegradación es líquido.

- Al aplicarse en forma líquida en suelos permeables existe mucha pérdida por lixiviación de algunos de sus componentes.



- Es necesario tener el suelo húmedo para hacer la aplicación del efluente porque si el suelo está seco existe gran pérdida de nitrógeno del efluente por volatilización (Feigin *et al.*, 1991).

#### 2.2.4. Usos del biogás:

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. El gráfico que se encuentra a continuación resume las posibles aplicaciones.

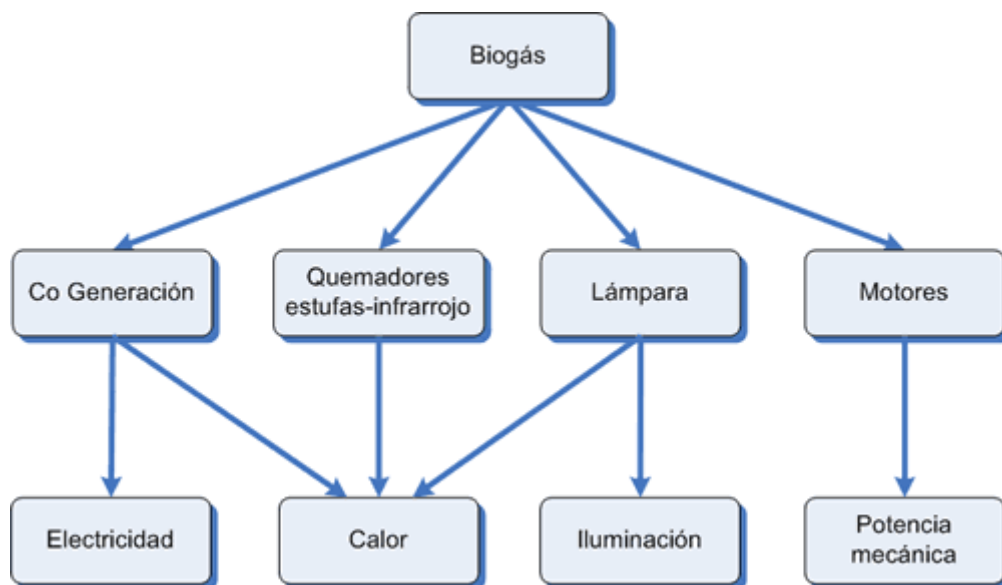
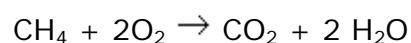
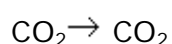
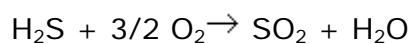


Fig. 5: Usos del biogás

#### Principios de la combustión

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas:





El requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión.

La relación aire-gas puede ser ajustada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior).

Debido al contenido de dióxido de carbono, el biogás tiene una velocidad de propagación de la llama lenta, 43 cm/seg y por lo tanto la llama tiende a escaparse de los quemadores.

La presión para un correcto uso del gas oscila entre los 7 y los 20 mbar. Se debe tener especial cuidado en este aspecto debido a que se deberán calcular las pérdidas de presión de salida del gasómetro (adicionándole contrapesos en el caso de gasómetros flotantes).

### Diferentes aplicaciones del biogás

En el cuadro se han listado los principales artefactos que utilizan biogás juntamente a su consumo medio y su eficiencia.

ARTEFACTO	CONSUMO	RENDIMIENTO (%)
<b>Quemador de cocina</b>	300 - 600 l/h	50 - 60
<b>Lámpara de gas (60W)</b>	120 - 170 l/h	30 - 50
<b>Frigorífico de 100 L</b>	-30 - 75 l/h	20 - 30
<b>Motor a gas</b>	0,5 m <sup>3</sup> /kWh o Hph	25 - 30
<b>Quemador de 10 kW</b>	2 m <sup>3</sup> /h	80 - 90
<b>Co generador</b>	1 kW elect. 0,5 m/kWh 2kW térmica	hasta 90

Tabla 2: Aplicaciones del biogás

Las cocinas y calentadores son fácilmente modificables, agrandando el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala.



Las lámparas a gas tienen una muy baja eficiencia y el ambiente donde se las utilice debe estar adecuadamente ventilado para disipar el calor que generan.

Los frigoríficos domésticos constituyen un interesante campo de aplicación directo del biogás debido a que tienen un consumo parejo y distribuido a lo largo de las 24 horas del día lo cual minimiza la necesidad de almacenaje del gas. Recientemente se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y/u otros productos agrícolas lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del mismo.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diesel. 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.

En los motores de Ciclo Otto el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen funcionando con un 100% de biogás con una merma del la potencia máxima del 20% al 30%.

A los motores de Ciclo Diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás diesel y pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual los hace muy confiables. El gasoil no puede ser reemplazado en los motores funcionando a campo del 85% al 90%, debido a que la autonomía conseguida menor comparada con la original.

La proporción de  $H_2S$  en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los aceites lubricantes. El grado de deterioro en los motores varía considerablemente y los resultados obtenidos experimentalmente suelen ser contradictorios.

Los motores a biogás tienen amplio espectro de aplicación siendo los más usuales el bombeo de agua, el picado de raciones y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural. El otro uso muy generalizado es su empleo para activar generadores de electricidad.

Un párrafo aparte merecen los sistemas de cogeneración. Dichos sistemas buscan la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás.

En estos casos la potencia mecánica provista por el eje del motor es aprovechada para generar electricidad a través de un generador. Simultáneamente y por medio de una serie de intercambiadores de calor ubicados en los sistemas de refrigeración (agua y aceite) del motor y en la salida de los gases de escape, se recupera la energía térmica liberada en la combustión interna. De este modo se logra un mejor aprovechamiento de la energía.

La difusión de estos sistemas estará condicionada por la rentabilidad final. Sin embargo representa la utilización más racional del biogás ya que se obtiene una forma de energía extremadamente dúctil como la electricidad al mismo tiempo que una fuente de calor muy necesaria para la calefacción de digestores en zonas frías.

El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. 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 cara y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.

Otra aplicación del biogás es la generación de energía mediante calderas y turbinas de gas. Un caso especial de este tipo de generación es el del vertedero controlado de Bouqueval/Plessis-Gassot, el cual se encuentra a unos 20km al norte de París. La producción total de biogás se eleva a 13.000 m<sup>3</sup>/hora, de los que se valorizan 10.000 m<sup>3</sup> para producir 10 MW/hora de electricidad, es decir, el consumo medio de una ciudad de 30.000 habitantes. Tras su captación y control, los 10.000 m<sup>3</sup> de biogás que se producen en el vertedero controlado de Bouqueval se queman en tres calderas. Los quemadores de estas calderas se adaptan automáticamente a la cantidad y a la calidad del biogás entrante, es decir, a su contenido en

metano. Cada una de las calderas suministra 30 toneladas de vapor a 380° C, a una presión de 40 bares. Este vapor pone en marcha la turbina que gira a 7.500 rpm, conectada a su vez a un alternador que, produce cerca de 20.000 voltios de electricidad. Una turbina de vapor transforma la energía del flujo de vapor de agua en energía mecánica. Al pasar por las toberas de la turbina, se reduce la presión del vapor (se expande) aumentando así su velocidad. Este vapor a alta velocidad es el que hace que los álabes móviles de la turbina giren alrededor de su eje al incidir sobre los mismos.

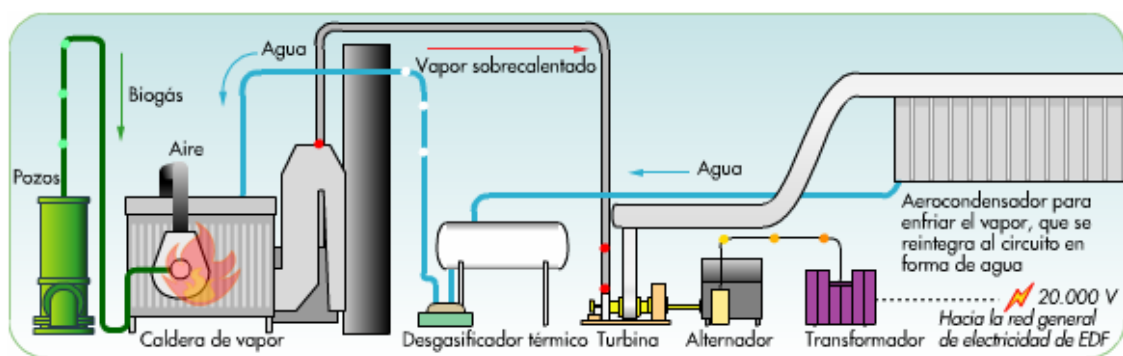


Fig. 6: Turbina de biogás

### 2.3. Tipos de biodigestores

Hay muchos tipos de plantas del biogás pero los más comunes son el dosel flotante (indio) y el domo fijo (chino). La pobre aceptabilidad de muchos de estos biodigestores ha sido principalmente debida a los costos altos, la dificultad de instalación y problemas en la consecución de las partes y repuestos.

#### 2.3.1. Pozos sépticos

Es el más antiguo y sencillo digestor anaerobio que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de allí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaeróbica, para el uso doméstico.

Para la correcta operación de estos pozos es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en él, de las que contienen jabón o detergentes. El efecto de los jabones y en especial los detergentes, inhibe la

acción metabólica de las bacterias, razón por la que los pozos se colmatan con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para recomenzar la operación.

Cuando no es posible separar las aguas negras de las jabonosas, como en el alcantarillado urbano, es necesario hacer un tratamiento químico con polímeros a esta agua a fin de solucionar el problema antes de iniciar la fermentación anaeróbica.

### 2.3.2. Biodigestor de domo flotante (India)

Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que se desplaza por una guía central. Este biodigestor trabaja a presión constante y es muy fácil su operación ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de muy poca preparación. El reactor se alimenta semi-continuamente a través de una tubería de entrada.

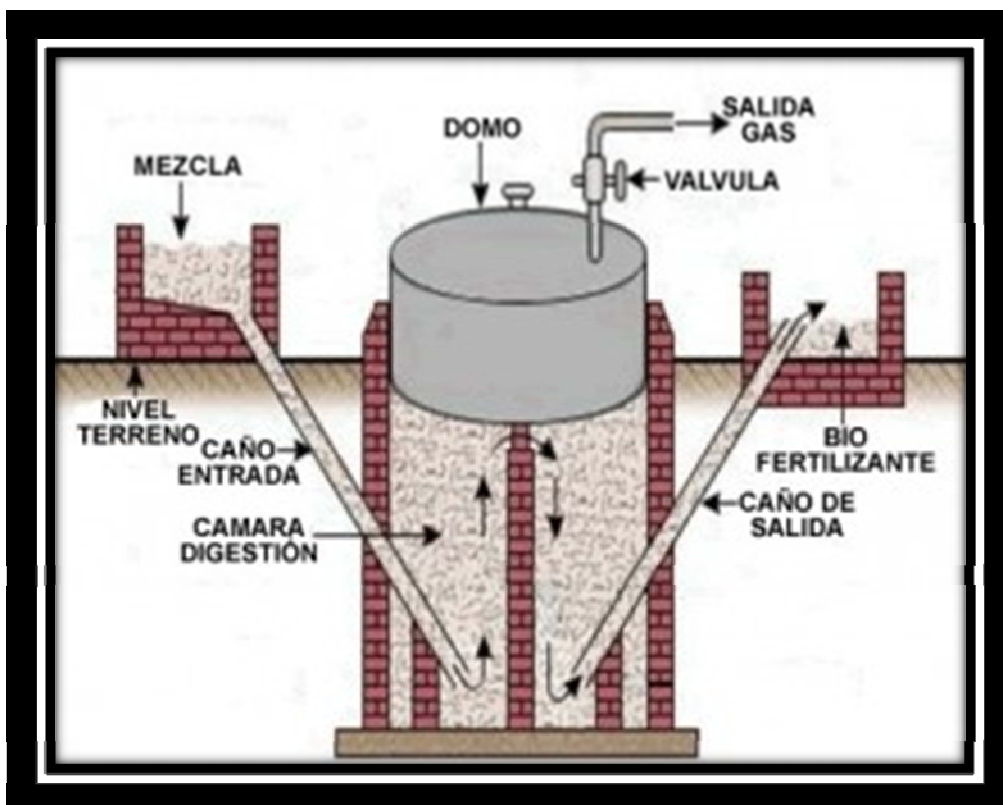


Fig. 7: Biodigestor domo flotante





### 2.3.3. Biodigestor de domo fijo (Chino)

Este reactor consiste en una cámara de gas de volumen constante construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cúpula y el fondo son hemisféricos y están unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y los extremos nivelados. Hay un tapón para inspección en la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo que al no ser flexible varía los volúmenes del digestor en la cámara del efluente, con presiones en el domo entre 1 y 1.5 m de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la razón por lo que la cúpula y el fondo deben ser redondos. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor. Más de cinco millones de biodigestores se han construido en China y ha funcionado correctamente (FAO, 1992) pero, desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de China.

Esta instalación tienen como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

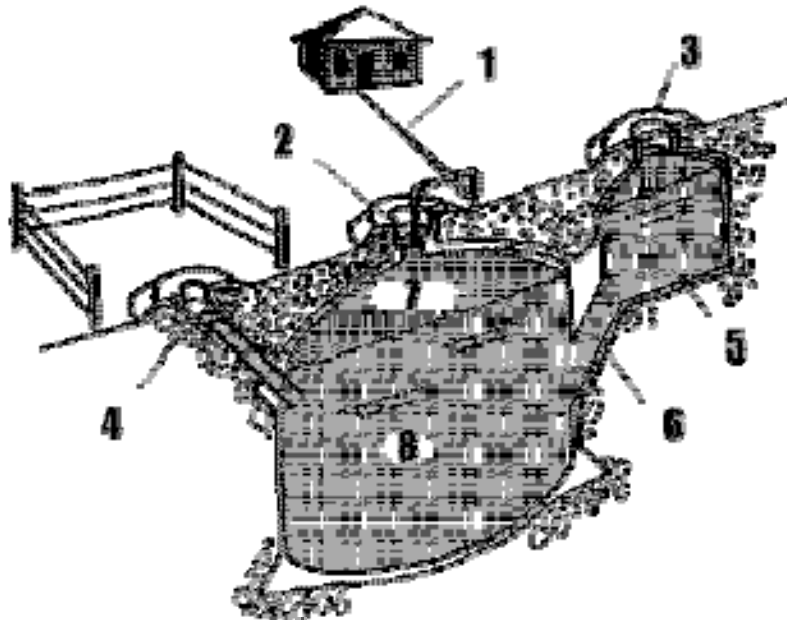


Fig. 8: Esquema del digestor chino: 1. tubería de salida del gas; 2. Sello removible; 3. Tapa móvil; 4. Entrada; 5. Tanque de desplazamiento; 6. Tubería de salida; 7. Almacenamiento de gas; 8. Materia orgánica.

#### 2.3.4. Biodigestor de estructura flexible

La inversión alta que exigía construir el biodigestor de estructura fija resultaba una desventaja limitante para el bajo ingreso de los pequeños granjeros. Esto motivó a ingenieros en la Provincia de Taiwán alrededor de 1960 (FAO, 1992) a hacer biodigestores de materiales flexibles más baratos. Inicialmente se usaron nylon y neopreno pero demostraron ser relativamente costoso. Estos materiales fueron reemplazados después por polietileno (generalmente una lámina de plástico de las que se usan en los invernaderos) menos costoso y que es ahora el material más comúnmente usado en América Latina, Asia y África. Desde 1986, el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando biodigestores de plástico económico como la tecnología apropiada por hacer mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo la presión así en otros recursos naturales.

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con Biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma.



Fig. 9: Biodigestor de polietileno

#### 2.3.5. Digestor flotante

Un rasgo innovador de usar polietileno tubular es que los biodigestores pueden localizarse para flotar en cualquier superficie de agua, con la mitad sumergida, su boca se localiza sobre el nivel de agua más alto, mientras la toma de corriente debe ajustarse a un objeto flotante, como un coco seco o un recipiente de plástico. En Vietnam más de 5% de los biodigestores flotantes se ubican en estanques que facilitan su instalación, generalmente donde el espacio de las granjas es limitado.



Fig. 10: Biodigestor flotante

### **2.3.6. Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno**

Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta un 30 % con respecto a los prototipos tradicionales, es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales. Este tipo de instalación posee a su favor que resulta más económica que los sistemas tradicionales; por ejemplo, una instalación de 4 m<sup>3</sup> puede costar, aproximadamente, \$550 USD, y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida útil.

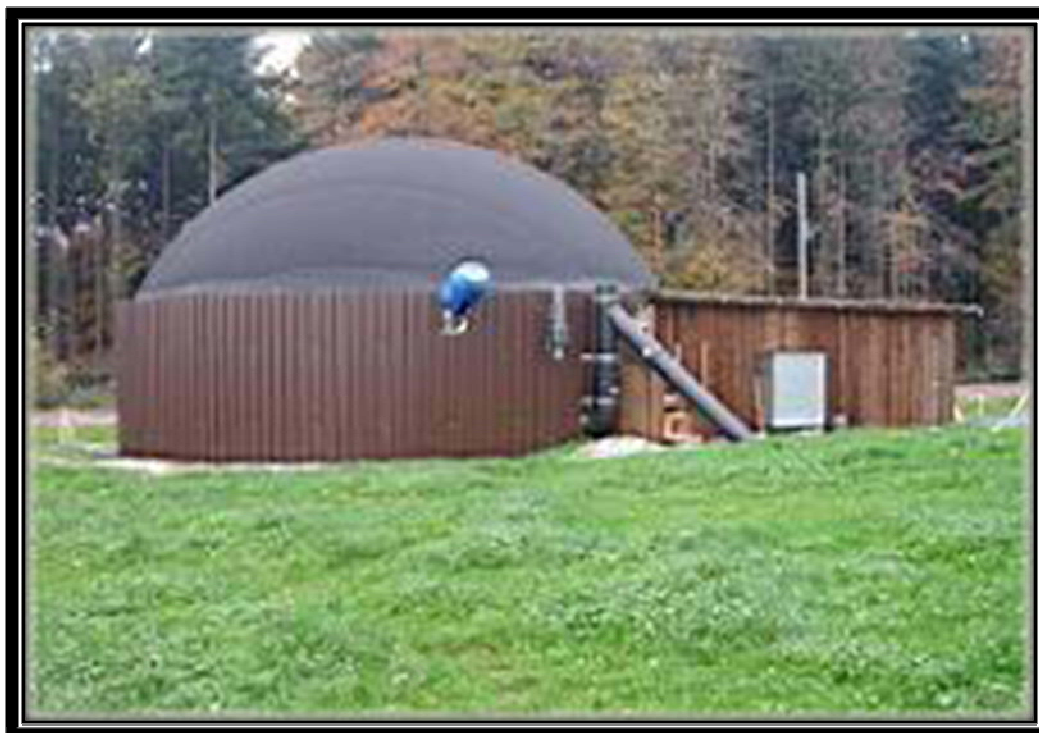


Fig. 11: Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.

### 2.3.7. Digestores de alta velocidad o flujo inducido

Estos son los utilizados comúnmente en instalaciones industriales o semindustriales. Generalmente trabajan a presión constante, por lo que se podrían catalogar como digestores tipo hindú modificado.

Se diferencian de los digestores convencionales en que se les ha agregado algún tipo de agitación mecánica, continua o intermitente, que permite al material aún no digerido, entrar en contacto con las bacterias activas y así obtener buena digestión de la materia orgánica, con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, de hasta 15 días (ver fig. 12). Esto se consigue gracias a la desintegración de partículas grandes en otras más pequeñas, que aumentan el área de contacto y por lo tanto la velocidad de digestión.

Este es un concepto nuevo dentro de la tecnología de fermentación anaeróbica, combina las ventajas de varios tipos de digestores en una sola unidad, facilitando el manejo y procesamiento de material biodegradable de diverso origen y calidad.

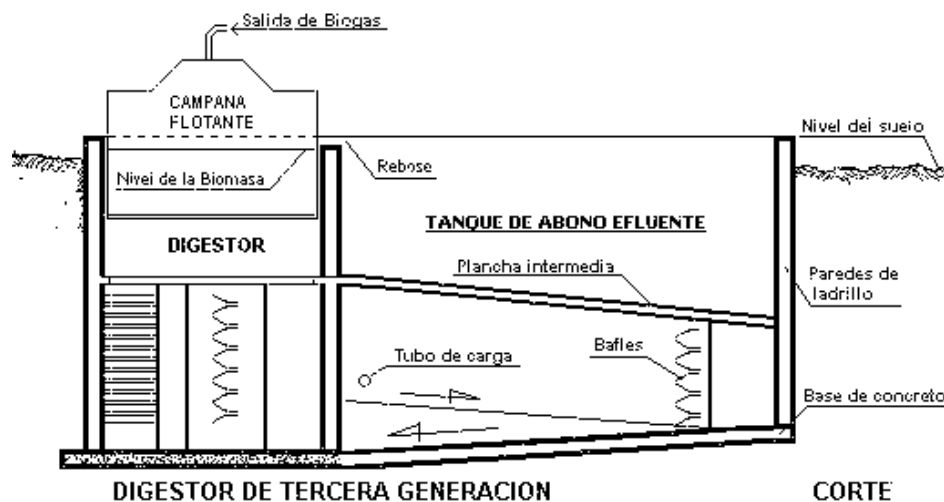


Fig. 12: Digestor de tercera generación

### 2.3.8. Instalaciones industriales

Las instalaciones industriales de producción de biogás emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado.

Este tipo de planta, debido al gran volumen de materia orgánica que necesita para garantizar la producción de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtiene, se diseña con grandes estanques de recolección y almacenamiento contruidos de ladrillo u hormigón.

Con el objetivo de lograr su mejor funcionamiento se usan sistemas de bombeo para mover el material orgánico de los estanques de recolección hacia los biodigestores, y el biofertilizante de los digestores hacia los tanques de almacenamiento. También se utilizan sistemas de compresión en los tanques de almacenamiento de biogás con vistas a lograr que éste llegue hasta el último consumidor. Para evitar los malos olores se usan filtros que separan el gas sulfhídrico del biogás, además de utilizarse válvulas de corte y seguridad y tuberías para unir todo el sistema y hacerlo funcionar según las normas para este tipo de instalación.

La tendencia mundial en el desarrollo de los biodigestores es lograr disminuir los costos y aumentar la vida útil de estas instalaciones, con el objetivo de llegar a la mayor cantidad de usuarios de esta tecnología.



## **2.4. Regímenes de alimentación**

En función de los flujos de entrada y salida, la operación de un biorreactor puede ser de tres modos distintos:

- Lote o discontinuo (Batch)
- Lote alimentado o semicontinuo (Fed-Batch)
- Continuo

### **2.4.1. Lote o discontinuo (Batch):**

Se cargan de una vez en forma total, descargándose cuando han dejado de producir biogás o la biomasa está suficientemente degradada. Consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

Este sistema es aplicable en situaciones particulares, como de materia orgánica a procesar está disponible en forma intermitente. En estos casos normalmente se usa varios digestores cargados en diferentes tiempos para mantener la continuidad del suministro de gas.

### **2.4.2. Lote alimentado o semicontinuo (Fed-Batch):**

Es el tipo de digestores más usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los que más difusión tuvieron en un principio, como se indican en apartados anteriores, fueron el tipo Chino y el tipo Hindú. Más adelante se han desarrollado nuevas tecnologías de diversas aplicaciones.

### **2.4.3. Continuo:**

Fueron desarrollados principalmente para el tratamiento de aguas negras, extendiéndose su uso, en la actualidad, al manejo de otros sustratos.

En general son plantas muy grandes en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto este tipo genera una gran cantidad de biogás el que a su vez es aprovechado en aplicaciones de las grandes industrias o en la demanda de gas de una población, colocándolos dentro de la red de la ciudad.





### **3. DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **3.1. Investigación bibliográfica**

La investigación bibliográfica constituye una de los periodos más complicados dentro de la elaboración de un proyecto fin de carrera. Durante los primeros meses recurrí a la obtención de una gran cantidad de información para poder hacer la mejor clasificación y obtener las bases necesarias y el estado de la técnica que iba a utilizar posteriormente para desarrollar el trabajo.

Durante el desarrollo de este capítulo se resumen y comentan brevemente aquellos trabajos de investigaciones recientes que han tratado sobre la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos y sobre el proceso de la codigestión utilizando diferentes sustratos.

Para realizar la revisión bibliográfica fue necesario consultar varias fuentes de información. Primero hice una lista de términos o palabras claves con las cuales buscar en los servicios de documentación, ya fueran bases de datos, revistas o documentos electrónicos.

Los medios consultados para esta investigación fueron la bibliografía disponible en el catálogo de las bibliotecas de la Universidad Carlos III de Madrid. Dentro del catálogo consulté los recursos electrónicos disponibles tales como bases de datos, tesis doctorales, libros electrónicos (monografías) y sumarios electrónicos.

Para la búsqueda en los recursos electrónicos se utilizaron buscadores como Google, Terra, AOL Search, Yahoo, entre otros.

Los resultados obtenidos en la investigación bibliográfica se pueden clasificar en dos grandes grupos según la cantidad de información encontrada: En primer lugar biodigestores alimentados con excretas (J. Martí Herrero, 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia) y en segundo lugar biodigestores alimentados con otros desechos orgánicos, en este caso pulpa de café, plátano y suero de leche (Italia Chinappi Ciccolella, 2009. Biodigestión anaeróbica de la pulpa de café).

Sobre la producción de energía a partir de la digestión anaeróbica de los fangos de depuradora se puede encontrar gran cantidad de información debido a que se trata de una tecnología que ha estado en uso en todo el mundo por más de 30 años. Su viabilidad y rentabilidad depende no sólo de las cantidades producidas de biogás, la tecnología disponible y la eficiencia de la operación de tratamiento de aguas residuales sino también en la unidad de parámetros externos, como el costo de producción local de la energía y los recursos energéticos disponibles (María Estela Montes Carmona, 2008. Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás)

### **3.2. Plan de trabajo**

El plan inicial de trabajo estaba orientado exclusivamente al trabajo de biodigestores alimentados con desechos del proceso de despulpado de café de fincas de la zona de Estelí. Consistía en una parte experimental y otra orientada a la práctica constructiva de un biodigestor modelo en una de las fincas atendidas por la entidad FUNICA en coordinación con la FAREM Estelí. Debido a un retraso en el comienzo del proyecto mi llegada a Nicaragua coincidió con la finalización de la temporada de café, lo que conllevaba la falta de materia orgánica para la realización del trabajo. Este contratiempo nos llevó a pensar en diferentes materias orgánicas que estarían disponibles para alimentar los biodigestores. Estelí tiene un entorno prácticamente rural, como gran parte de Nicaragua, lo que nos facilitó la obtención de gallinaza (excretas secas de gallina mezcladas con cascarilla de arroz), cáscaras de plátano y suero de leche (producido por las queserías de la zona en la elaboración de cuajadas).

También estaba prevista la construcción de tres biodigestores portátiles con el fin de caracterizar la biodigestión de los desechos orgánicos que teníamos. Dentro de los biodigestores utilizamos diferentes mezclas de materia orgánica en distintas relaciones para poder obtener los máximos resultados posibles. La caracterización de dichos resultados consistió en mediciones macroscópicas de las condiciones de producción de biogás, así como también del análisis bioquímico de los afluentes y efluentes de los



biodigestores portátiles. Conforme avanzaba el trabajo nos dimos cuenta de que no teníamos manera de controlar los parámetros básicos dentro de los biodigestores portátiles, lo que supuso un rediseño de los mismos. Este nuevo diseño que sí permitía el seguimiento del pH y la temperatura sin necesidad de interrumpir la biodigestión anaerobia, convirtió a los biodigestores portátiles en una herramienta muy útil de cara a su utilización de manera docente en prácticas para los estudiantes de energías renovables en la FAREM Estelí. Los análisis de los efluentes no se pudieron llevar a cabo en Nicaragua. Esta parte experimental estuvo acompañada por el Prof. Emilio Lanuza y el Prof. René Miranda Urbina.

El trabajo práctico contemplaba el uso de las instalaciones del "Parque de Ciencias Estelimar", que cuenta con una pequeña plantación de café, maquinarias para el despulpado de café, un biodigestor "estándar". En esta parte, el contacto de trabajo fue el Prof. Juan Alberto Betanco. Sin embargo, el biodigestor de Estelimar se encontraba en desuso y diseñado para que no fuera continuo. El principal trabajo práctico fue el rediseño y la posterior construcción de este biodigestor con la finalidad de convertirlo en un biodigestor continuo. Para esta parte conté con la ayuda de un grupo de alumnos de 3<sup>er</sup> curso de Ingeniero en Energías Renovables de FAREM Estelí.

En esta parte práctica se pretendió trabajar con FUNICA, en una finca cafetalera de la zona de Estelí. La idea central fue proponer un sistema biodigestor para el tratamiento de los desechos del despulpado de café (pulpa y aguas mieles) con un diseño basado sobre los resultados experimentales tanto del Parque de Ciencias como los de laboratorio (biodigestores portátiles). Esta parte no se pudo terminar debido a la falta de pulpa de café y al tener que terminar la construcción del biodigestor del Parque Científico de Estelimar. El contacto con FUNICA fue a través de la Prof. Digna Betanco.

### **3.3. Parte práctica**

Para la parte práctica se elaboró con ayuda del profesor Edwin A. Reyes una tabla con todos los materiales necesarios para la construcción de un biodigestor portátil.

ITEM	DESCRIPCION	UM	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (córdobas)	COSTO TOTAL (córdobas)
1	Bidón	und	1	60,00	60,00
2	Llaves de pase de 1/2"	und	3	30,00	90,00
3	Neumáticos # 14	und	1	20,00	20,00
4	Bridas 1/2" sin fin	und	2	5,00	10,00
5	Bridas 1" sin fin	und	1	5,00	5,00
6	Terminal para manguera	Pares	1	40,00	40,00
7	Arandelas grandes	und	3	2,00	6,00
8	T pvc 1/2	und	2	5,00	10,00
9	Tapón pvc 1/2"	und	1	5,00	5,00
10	Manguera Transparente 1/2"	m	4	11,00	44,00
11	Tubo pvc 1/2"	und	2	26,00	52,00
12	Reductores 3/4" a 1/2"	und	2	5,00	10,00
13	Adaptador 3/4"	und	1	6,00	6,00
14	Adaptadores 1/2" macho y hembra	und	2	5,00	10,00
15	Teflón	und	2	5,00	10,00
16	Pega pvc	gl	2	25,00	50,00
17	Adaptador 3/4" roscado	und	1	7,00	7,00
18	Codo 3/4" roscado	und	1	7,00	7,00
19	Arandela hule/caucho	und	2	0,00	0,00
	<b>TOTAL</b>				<b>442,00</b>
	<b>TOTAL EN EUROS</b>				<b>14,54 €</b>

Tabla 3: Materiales del biodigestor portátil. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan una serie de fotografías que pueden servir de ayuda para la construcción paso a paso del biodigestor portátil.

El primer paso es recortar el tubo de PVC que servirá como canalización para el biogás. Sobre este tubo se acoplarán las llaves de paso y la válvula de seguridad.



Fig. 14: Tubo de PVC y conexiones. Fuente: Elaboración propia

Una vez construida la canalización del biogás que salga del biodigestor, el siguiente paso será el acople de la manguera cuya finalidad es unir el biodigestor con el tanque dónde almacenaremos el biogás, en nuestro caso este tanque será un neumático. Para el acople de la manguera se utilizarán terminales para manguera y reductores de diámetro. Es muy importante asegurarse de que no habrá fugas de biogás.



Fig. 15: Conexión con la manguera. Fuente: Elaboración propia

A continuación, acoplaremos los tubos que conducirán el biogás al bidón donde se producirá la digestión anaeróbica. En este caso el procedimiento fue hacer un agujero en la tapa de rosca del bidón y atravesarlo con un adaptador macho-hembra. En la parte del adaptador que quedará dentro del bidón es recomendable hacer unos agujeritos para aumentar la superficie por la que saldrá el biogás hacia el neumático. Estos agujeros evitarán que la salida se tapone por los gases de dentro del bidón.

Para evitar fugas de gas se usaron unas arandelas de caucho y teflón para sellar.



Fig16: Tapón del bidón. Fuente: Elaboración propia



Para la conexión entre la manguera y el neumático se usaron unas bridas y teflón con el fin de minimizar las fugas



Fig. 17: Conexión neumático-manguera. Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de poder hacer un seguimiento de lo que estaba pasando dentro del biodigestor sin necesidad de abrirlo se introdujo la mejora de poner una llave de paso en su parte inferior. Para esto, se introdujo un codo roscado dentro del bidón, en el que previamente se había realizado un agujero de diámetro ligeramente menor que el tubo de PVC. Con un adaptador roscado se acopló el codo al tubo y sobre éste se instaló una llave de paso. Para evitar fugas de la materia en el interior del bidón, se reforzaron las uniones con arandelas de caucho y de metal. El resultado permitió realizar el seguimiento deseado de las condiciones de biodigestión.



Fig. 18: Llave de paso en la parte inferior del bidón. Fuente: Elaboración propia

Este es el bidón finalizado con la válvula de seguridad instalada. La válvula de seguridad se realiza con una botella de refresco. Se hace un agujero en su parte superior para poder ir rellenándola de agua cuando ésta se vaya evaporando. Esta válvula va a permitir que en caso de que no se consuma biogás, éste tenga un lugar por donde escapar y a la vez evitar que entre aire de fuera (que mataría el proceso interno del biodigestor que produce biogás).



Fig. 19: Biodigestor con la válvula de seguridad. Fuente: Elaboración Propia





Estas imágenes son del biodigestor que funcionó con gallinaza. Se puede observar que el neumático que almacena el gas está prácticamente lleno.



Fig. 20: Biodigestor de gallinaza en el exterior. Fuente: Elaboración propia



Fig. 21: Detalle del neumático. Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Parte experimental

La parte experimental de este proyecto estaba centrada principalmente en la caracterización de la digestión anaerobia con residuos procedentes del despulpado de café tales como la pulpa de café y el agua miel. Debido a que las fechas en las que se realizó el proyecto coincidieron con el final de la temporada de recolección de café, no fue posible conseguir materia orgánica húmeda suficiente para poder analizar su pH y temperatura dentro del biodigestor. Lo que sí se consiguió fue determinar los contenidos de humedad, sólidos volátiles y cenizas siguiendo esta metodología:

#### **Determinación de los contenidos de humedad, sólidos volátiles y cenizas de una muestra orgánica... Metodología y tablas de resultados.**

##### *Paso 1: Determinación del contenido de humedad de la muestra.*

El método de determinación se basa en la norma UNE 77030:1982 para la "Determinación de Sólidos Totales en aguas". Para ello se colocan dos muestras idénticas de pulpa en dos recipientes de aluminio, en una cantidad de 1 kg por recipiente. Introducir las muestras preparadas y numeradas en el horno y mantenerlas por unas 24 horas a una temperatura constante de 105 °C.

Al finalizar el tiempo de deshidratación, se debe medir la masa de cada una de las muestras y anotarlas. Se obtiene así la masa seca, y la diferencia a la masa de entrada es el contenido de humedad de la muestra.

##### *Paso 2: Determinación de los contenidos de sólidos volátiles y cenizas.*

Las muestras secas, se deben introducir en el horno a una temperatura de 550 °C. En esta etapa, se debe producir la combustión de las muestras, saliendo humo del horno a través de sus tubos de escape hacia el exterior. Se debe dejar que la combustión se complete, y para ello



debe observarse que después de cierto tiempo, ya no sale humo del horno. Para asegurarse de que no haya habido una combustión incompleta, deberá esperarse unos 20 a 30 minutos después de la última escapada de humo del horno.

Al final de este proceso, se debe abrir el horno con mucho cuidado, y sacar las muestras usando equipo adecuado para evitar daños por quemadura. Una vez se ha enfriado el recipiente y su contenido se miden las masas de las muestras, haciendo la observación de que realmente se trate de cenizas.

A la masa seca se le resta la de cenizas, y se obtiene así el contenido de sólidos volátiles de la muestra.

*Paso 3: Balance de masa*

Parámetros   Muestras Masa seca	$M_{s1}$	$M_{s1}$
Masa seca [g]	186	188
Sólidos Volátiles <sup>(e)</sup> [g]	124	118
Cenizas <sup>(f)</sup> [g]	62	70
Porcentaje de sólidos volátiles <sup>(g)</sup>	66,67 %	62,76 %
Porcentaje de cenizas <sup>(h)</sup>	33,33 %	37,24 %

Tabla 4: Muestreo de afluentes de pulpa de café del biodigestor portátil, antes y después de la incineración. Fuente: Elaboración propia.

<sup>(e)</sup> Se obtiene por medio de la ec.3 al conocerse la masa seca y la masa de cenizas.

<sup>(f)</sup> Se mide directamente con la balanza.

<sup>(g)</sup> y <sup>(h)</sup> Se obtienen de las ec.4,  $M_{rsv}$  y  $M_{rc}$ , respectivamente.

<b>M1</b>	<b>Base Húmeda</b>	<b>Base Seca</b>
Porcentaje de humedad <sup>(i)</sup>	81,4 %	-
Porcentaje de sólidos volátiles <sup>(j)</sup>	12,4 %	66,67 %
Porcentaje de cenizas <sup>(k)</sup>	6,2 %	33,33 %
	100.0%	100.0%
<b>M2</b>		
Porcentaje de humedad	81,2 %	-
Porcentaje de sólidos volátiles	11,8 %	62,76 %
Porcentaje de cenizas	7 %	37,24 %
	100.0%	100.0%
<b>Valores promedios</b>		
Porcentaje de humedad	81,3 %	-
Porcentaje de sólidos volátiles	12,1 %	64,715 %
Porcentaje de cenizas	6.6 %	35,285 %
	100.0%	100.0%

Tabla 5: Resumen del muestreo de los afluentes de pulpa de café del biodigestor portátil.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>(i)</sup> Igual a <sup>(c)</sup>.

<sup>(j)</sup> Se obtiene de dividir la masa de sólidos volátiles entre la masa bruta correspondiente, en base húmeda.

<sup>(k)</sup> Se obtiene de dividir la masa de ceniza entre la masa bruta correspondiente, en base húmeda.

### **Determinación de los contenidos de humedad, sólidos volátiles y cenizas de los estratos de materia (Cálculos numéricos)**

- Determinación de la humedad: Como se conoce, toda materia orgánica tiene la composición anterior, es decir:

$$M_b = M_h + M_s \quad \text{ec. 1}$$

Donde: Mb es la masa bruta o total, Mh masa húmeda, Ms masa seca. El secado a 105°C durante 24 h se realiza para asegurar la evaporación del agua contenida en el material. A partir de la ec.1 se determinan los porcentajes contenidos de masa húmeda, que se pierde por evaporación tras el secado, y de masa seca, por medio de:



$$M_{rh} \% = \frac{M_h}{M_b} * 100\%$$

y

$$M_{rs} \% = \frac{M_s}{M_b} * 100\% \quad \text{ec. 2}$$

- Determinación de las cenizas: Este es un procedimiento que se realiza dentro de un horno hermético a una temperatura igual o mayor a 450°C. Durante esta etapa, la materia orgánica rompe todos sus enlaces pasando por un proceso de pirolisis hasta su gasificación casi total. Cuando esto sucede, la masa seca puede separarse, como efectivamente se conoce, en dos partes: la parte de los sólidos volátiles y la de cenizas. Durante la gasificación de la materia las cenizas quedan, y son los sólidos volátiles los que se escapan en forma de gas. Entonces, luego de la combustión del material, se procede a medir la masa de las cenizas. La diferencia a la masa seca menos la de cenizas es la masa de los sólidos volátiles:

$$M_{sv} = M_s - M_c \quad \text{ec. 3}$$

Y por analogía con el procedimiento de los porcentajes de contenido en la masa, se obtiene los pesos para los sólidos volátiles y las cenizas en base seca por medio de ec.4:

$$M_{rsv} \% = \frac{M_{sv}}{M_s} * 100\%$$

y

$$M_{rc} \% = \frac{M_c}{M_s} * 100\% \quad \text{ec. 4}$$

Siguiendo esta metodología se obtuvieron diferentes resultados para cada materia restante usada en el biodigestor. A continuación se presentan dichos resultados:

### **Cáscara de plátano**

<b>Parámetros   Muestras Masa seca</b>	<b>M<sub>s1</sub></b>	<b>M<sub>s2</sub></b>
Masa seca [g]	60	63
Sólidos Volátiles <sup>(e)</sup> [g]	33	35
Cenizas <sup>(f)</sup> [g]	27	28
Porcentaje de sólidos volátiles <sup>(g)</sup>	55%	55%
Porcentaje de cenizas <sup>(h)</sup>	45%	45%

Tabla 6: Muestreo de afluentes de cáscara de plátano del biodigestor portátil, antes y después de la incineración.

<b>M1</b>	<b>Base Húmeda</b>	<b>Base Seca</b>
Porcentaje de humedad <sup>(i)</sup>	85%	-
Porcentaje de sólidos volátiles <sup>(j)</sup>	8,25%	55%
Porcentaje de cenizas <sup>(k)</sup>	6,75%	45%
	100.0%	100.0%
<b>M2</b>		
Porcentaje de humedad	84,25%	-
Porcentaje de sólidos volátiles	8,75%	55%
Porcentaje de cenizas	7%	45%
	100.0%	100.0%
<b>Valores promedios</b>		
Porcentaje de humedad	84,625%	-
Porcentaje de sólidos volátiles	8,5%	55%
Porcentaje de cenizas	6,875%	45%
	100.0%	100.0%



Tabla 7: Resumen del muestreo de los afluentes de cáscara de plátano del biodigestor portátil.

**Gallinaza**

Parámetros   Muestras Masa seca	M <sub>s1</sub>	M <sub>s2</sub>
Masa seca [g]	663	664
Sólidos Volátiles <sup>(e)</sup> [g]	361	358
Cenizas <sup>(f)</sup> [g]	302	306
Porcentaje de sólidos volátiles <sup>(g)</sup>	54,45 %	53,91 %
Porcentaje de cenizas <sup>(h)</sup>	45,55 %	46,09 %

Tabla 8: Muestreo de afluentes de gallinaza del biodigestor portátil, antes y después de la incineración.

M1	Base Húmeda	Base Seca
Porcentaje de humedad <sup>(i)</sup>	11,6 %	-
Porcentaje de sólidos volátiles <sup>(j)</sup>	48,13 %	54,45 %
Porcentaje de cenizas <sup>(k)</sup>	40,27 %	45,55 %
	100.0%	100.0%
M2		
Porcentaje de humedad	11,58 %	-
Porcentaje de sólidos volátiles	47,67 %	53,91 %
Porcentaje de cenizas	40,75 %	46,09 %
	100.0%	100.0%
Valores promedios		
Porcentaje de humedad	11,59 %	-
Porcentaje de sólidos volátiles	47,9 %	54,18 %
Porcentaje de cenizas	40,51 %	45,82 %
	100.0%	100.0%

Tabla 9: Resumen del muestreo de los afluentes de gallinaza del biodigestor portátil.

Para los experimentos con los desechos del despulpado de café se procedió a valorar tres muestras distintas en cada biodigestor portátil:

- Biodigestor 1: Cargado con 15,92 kg de agua miel que equivalen a 16,96 litros (densidad del agua miel determinada con la ayuda del picnómetro Gay-Lussac)
- Biodigestor 2: Cargado con 5,725 kg de pulpa de café mezclada con 11,5 litros de agua corriente ( $pH_{\text{agua}}=7,12$ ) en una relación 1:2
- Biodigestor 3: Cargado con 8 kg de pulpa de café mezclada con 8 kg de agua miel en una relación 1:1.

Para los estudios realizados con el suero de leche, la gallinaza y la cáscara de plátano los biodigestores contaban con la mejora de una llave de paso en su parte inferior, lo que permitió hacer un seguimiento del pH y la temperatura dentro del biodigestor sin necesidad de cortar el ciclo anaeróbico. A continuación los resultados de dichos seguimientos

	<b>Cáscara plátano</b>	<b>Suero leche</b>	<b>Gallinaza</b>
<b>Día</b>	21-jun-10	21-jun-10	02-jul-10
<b>1</b>	6,00	7,50	6,00
<b>3</b>	4,40	7,50	6,00
<b>5</b>	4,38	7,47	5,70
<b>7</b>	4,40	6,90	5,60
<b>9</b>	4,47	5,84	5,60
<b>11</b>	4,50	4,90	5,50
<b>13</b>	4,35	4,50	5,50
<b>15</b>	4,30	4,30	5,40
<b>17</b>	4,30	4,20	
<b>19</b>	4,35	4,25	
<b>21</b>	4,40	4,25	
<b>23</b>	4,50	4,20	



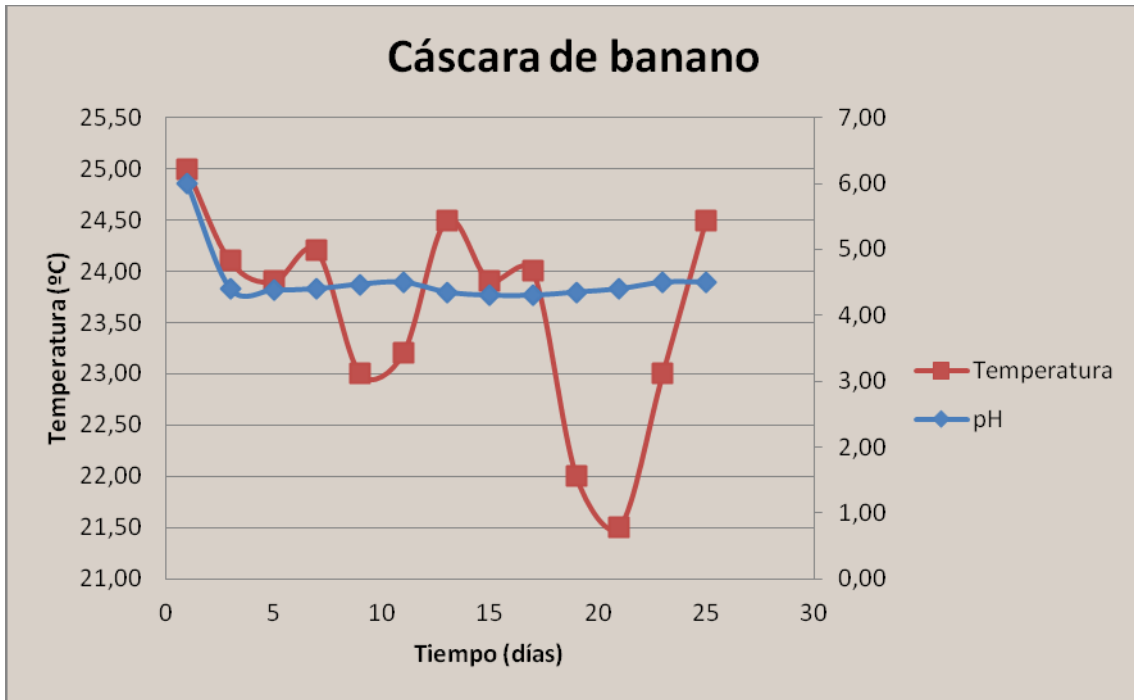


25	4,50	4,20
----	------	------

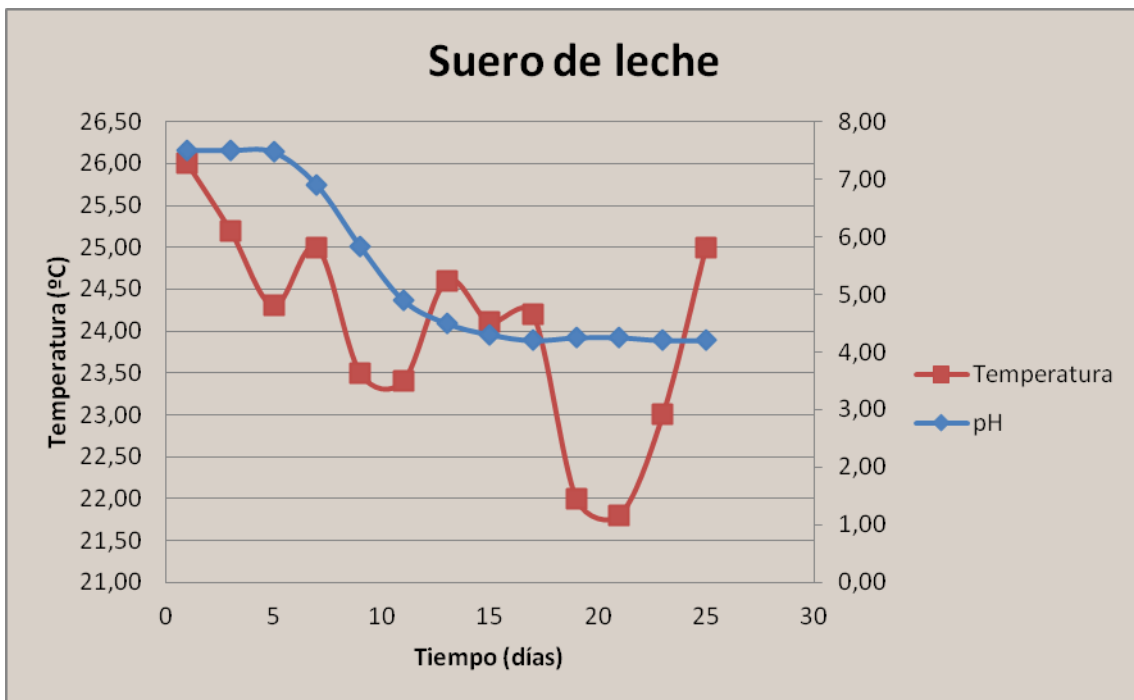
Tabla 10: Medidas de pH dentro del biodigestor. Fuente: Elaboración propia

	Cáscara plátano	Suero leche	Gallinaza
<b>Día</b>	21-jun-10	21-jun-10	02-jul-10
<b>1</b>	25,00	26,00	25,00
<b>3</b>	24,10	25,20	24,00
<b>5</b>	23,90	24,30	23,00
<b>7</b>	24,20	25,00	24,00
<b>9</b>	23,00	23,50	22,00
<b>11</b>	23,20	23,40	21,30
<b>13</b>	24,50	24,60	22,00
<b>15</b>	23,90	24,10	24,00
<b>17</b>	24,00	24,20	
<b>19</b>	22,00	22,00	
<b>21</b>	21,50	21,80	
<b>23</b>	23,00	23,00	
<b>25</b>	24,50	25,00	

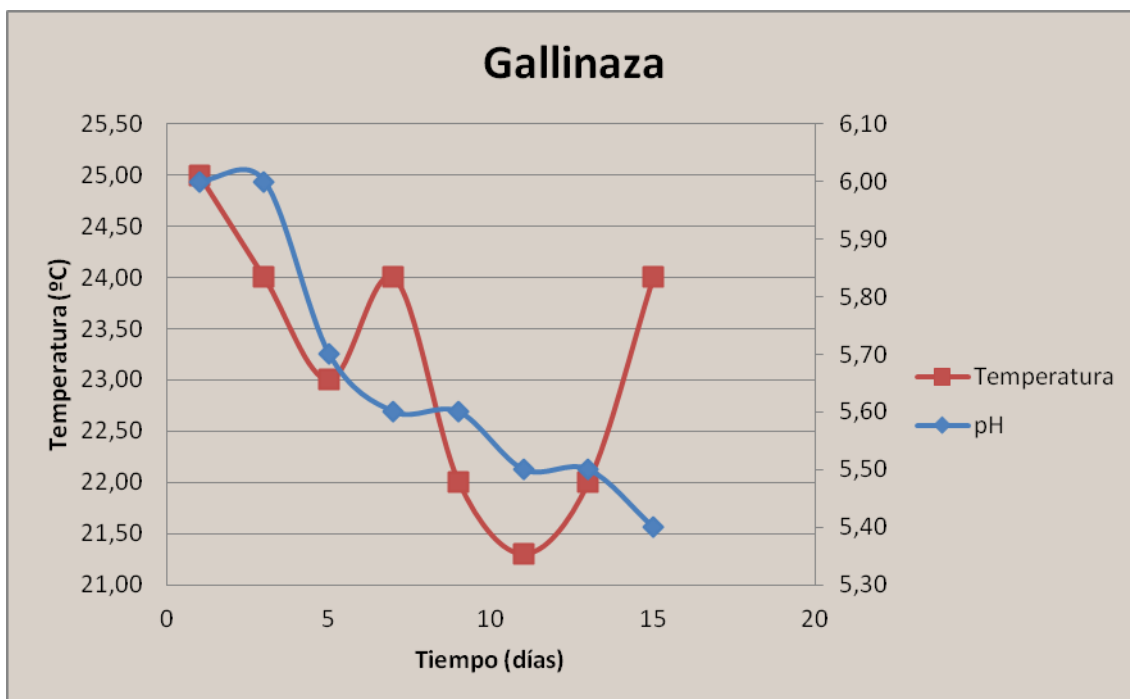
Tabla 11: Medidas de temperatura dentro del biodigestor. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 1: pH y temperatura de la cáscara de plátano. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2: pH y temperatura del suero de leche. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3: pH y temperatura de la gallinaza. Fuente: Elaboración propia

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

Estudiando las gráficas se puede observar cierta relación entre la temperatura y el pH dentro del biodigestor y la producción de biogás.

Antes de introducir la materia dentro del biodigestor se le añadía a ésta hidróxido de sodio en escamas con la finalidad de controlar su pH en la entrada del bidón. A medida que el pH bajaba, es decir, la mezcla se volvía más ácida, la producción de biogás se iba ralentizando hasta acabar parada. Esto es debido a que las bacterias en el interior del biodigestor cesan su actividad por la acidez del medio en el que están. Se puede observar que la materia que tuvo un pH más óptimo fue la gallinaza y el que se estabilizó antes fue la cáscara de plátano.

Lo mismo ocurre con la temperatura, al no tener ningún sistema de calefacción, la temperatura de los biodigestores dependía de la temperatura

ambiente. Por esta causa se observan los cambios en las gráficas. Lo ideal sería mantener una temperatura constante para facilitar la biodigestión.

La única manera que disponible para analizar el biogás fue quemarlo con la ayuda de un mechero Bunsen conectado por la manguera al neumático que almacenaba el biogás. Al quemarlo se apreciaba que la llama era azul, lo que nos indica la existencia de metano en el biogás producido debido a que la combustión con exceso de oxígeno es en general completa. (<http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrocarburos>)

En la figura 22 se puede observar el resultado de esta combustión y el deseado color azul de la llama.

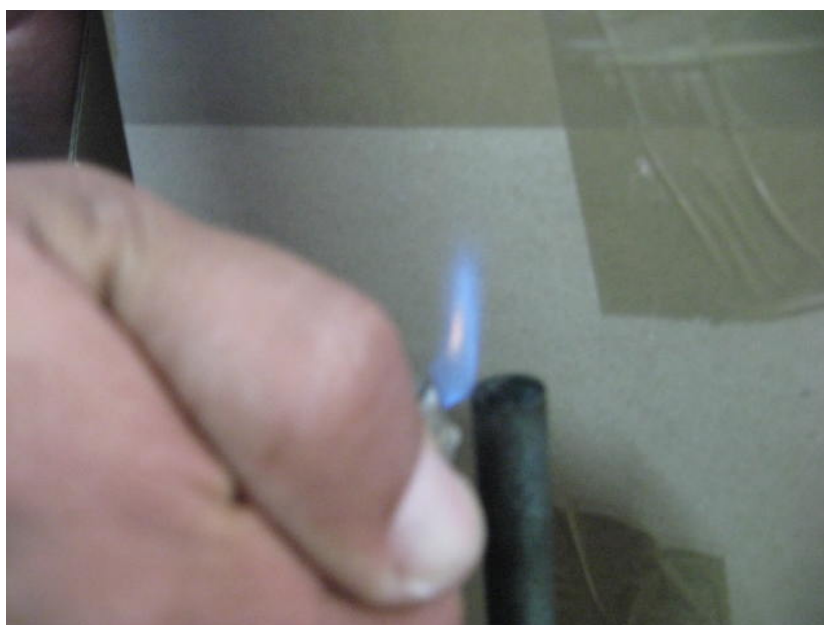


Fig. 22: Combustión del biogás. Fuente: Elaboración propia



#### 4. **CONCLUSIONES:**

La primera conclusión derivada de este trabajo es la importancia de los parámetros de la biodigestión anteriormente mencionados. En especial, cabe destacar la importancia del pH, de la temperatura y del mezclado de las materias dentro del biodigestor.

A lo largo de los diversos ensayos llevados a cabo, surgió la necesidad de poder llevar un exhaustivo control de dichos parámetros con el fin de conocer la razón por la cual los biodigestores dejaban de producir biogás.

Teniendo en cuenta las distintas mezclas de materias con las que se realizaron los ensayos, la más eficiente fue la gallinaza mezclada con agua. Al hablar de eficiencia me quiero referir a que fue la mezcla que produjo más biogás en menos tiempo, no a que produjese un biogás más rico en metano, ya que esto no se pudo analizar.

La cáscara de plátano también funcionó adecuadamente, a pesar de encontrarse en algunos momentos con un pH más bajo de lo deseado.

Sin embargo, tanto en las tres mezclas de residuos del despulpado de café como en el suero de leche aparecieron diversos problemas de mayor magnitud relacionados con el pH (demasiado ácido).

En los ensayos con la pulpa de café y las aguas mieles no se pudo hacer un seguimiento de la acidez sin interrumpir la biodigestión, pero sí se observó que se necesitaba mucho tiempo de retención para producir poco biogás.

Esto puede ser debido a la cantidad de azúcares presentes en estos residuos, por lo que sería mucho más interesante su estudio para producir bioetanol en lugar de biogás. Este estudio sería una buena línea de futuro para nuevos proyectos.

Otra línea de investigación abierta en este proyecto es la importancia de la temperatura en la biodigestión.

Los sistemas utilizados en este estudio no tenían ninguna posibilidad de controlar la temperatura a la que se encontraban, nada más que cambiándolos de sitio.

Esto supuso un gran problema cuando empezó la época de lluvias y el biodigestor de gallinaza se encontraba en el exterior debido a los olores que desprendía.

No obstante, se pudo comprobar que cuando había días más calurosos los biodigestores funcionaban mucho mejor que en días fríos o por las noches.



## 5. BIBLIOGRAFÍA:

Botero R. y T. R. Preston, 1987. "Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización". Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), Cali, Colombia

McCaskey, A.T., 1990. "Microbiological and chemical pollution potential of swine waste". Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol. CINVESTAV. Guadalajara, Jal., México

Mandujano M. I., Félix A. y Martínez A. M., 1981 "Biogás, Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, Manual para el promotor de la tecnología". México

Noyola A. y Monroy O., 1994. "Experiencias y expectativas del tratamiento de residuales porcinos en México". Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa.

I. Feigin, A., Ravina, I. y Shalnevet J., 1991. "Irrigation with treated sewage effluent. Management for environmental protection". Berlín, Alemania.

J. Martí Herrero, 2008. "Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación". GTZ-Energía. Bolivia

Italia Chinappi Ciccolella, 2009. "Biodigestión anaeróbica de la pulpa de café".

María Estela Montes Carmona, 2008. "Estudio técnico económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás". Universidad Politécnica de Madrid.

Tania del Carmen Beteta Herrera, 2005. "Construcciones y usos de biodigestores tubulares plásticos". Universidad Nacional Agraria de Nicaragua.

Franger Acuña Acuña, 2002. "Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de café en el beneficio Coopronaranjo S.L.". Costa Rica.

René Miranda Urbina, 2009. "Visita técnica hacienda Santa Emilia Estate". Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Joaquín Pérez Díaz. "Producción de biogás a escala del laboratorio empleando residuos orgánicos de la cocina". Universidad de Kyambogo, Uganda.

Fundación Hábitat, 2005. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes". Colombia.





## 6. ANEXO DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICOS:

Fig. 1: Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas; 1) bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) bacterias acetogénicas; 3) bacterias homoacetogénicas; 4) bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) bacterias metanogénicas acetoclásticas (Pavlosthatis, Giraldo-Gómez, 1991)

<http://biotecnologiapractica.spaces.live.com/blog/cns!C8FD86E60D0FA135!656.entry>

Fig. 2: Composición porcentual de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás.

<http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>

Fig. 3: Producción y composición del biogás para un digestor con tiempo de retención igual a 40 días.

<http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>

Fig. 4: Mediciones de pH dentro del biodigestor y el efluente.

<http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>

Fig. 5: Usos del biogás.

<http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/usos>

Fig. 6: Turbinas de biogás.

<http://materias.fi.uba.ar/6756/Aplicaciones%20del%20Biogas%201C%2007.pdf>

Fig. 7: Biodigestor domo flotante.

<http://www.energianatural.com.ar/biogas02.html>

Fig. 8: Esquema del biodigestor chino. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes". Fundación Hábitat

Fig. 9: Biodigestor de polietileno. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes". Fundación Hábitat

Fig. 10: Biodigestor flotante. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes" Fundación Hábitat

Fig. 11: Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes" Fundación Hábitat

Fig. 12: Digestor de tercera generación. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes" Fundación Hábitat

Fig. 13: Digestores industriales. "Biodigestores: Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes" Fundación Hábitat

Fig. 14: Tubo de PVC y conexiones. Fuente: Elaboración propia

Fig. 15: Conexión con la manguera. Fuente: Elaboración propia

Fig. 16: Tapón del bidón. Fuente: Elaboración propia

Fig. 17: Conexión neumático-manguera. Fuente: Elaboración propia

Fig. 18: Llave de paso en la parte inferior del bidón. Fuente: Elaboración propia

Fig. 19: Biodigestor con la válvula de seguridad. Fuente: Elaboración Propia

Fig. 20: Biodigestor de gallinaza en el exterior. Fuente: Elaboración propia

Fig. 21: Detalle del neumático. Fuente: Elaboración propia

Fig. 22: Combustión del biogás. Fuente: Elaboración propia

Tabla 1: Concentración inhibidora de inhibidores comunes. (Fuente FAO 1986)



Tabla 2: Aplicaciones del biogás.

<http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/usos>

Tabla 3: Materiales biodigestor portátil. Fuente: elaboración propia

Tabla 4: Muestreo de afluentes de pulpa de café del biodigestor portátil, antes y después de la incineración. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5: Resumen del muestreo de los afluentes de pulpa de café del biodigestor portátil. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6: Muestreo de afluentes de cáscara de plátano del biodigestor portátil, antes y después de la incineración. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7: Resumen del muestreo de los afluentes de cáscara de plátano del biodigestor portátil. Fuente: elaboración propia.

Tabla 8: Muestreo de afluentes de gallinaza del biodigestor portátil, antes y después de la incineración. Fuente: elaboración propia.

Tabla 9: Resumen del muestreo de los afluentes de gallinaza del biodigestor portátil. Fuente: elaboración propia.

Tabla 10: Medidas de pH dentro del biodigestor. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Medidas de temperatura dentro del biodigestor. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1: pH y temperatura de la cáscara de plátano. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2: pH y temperatura del suero de leche. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3: pH y temperatura de la gallinaza. Fuente: Elaboración propia