



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

*ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UNA
PLANTA DE BIOGÁS PARA LA FES ARAGÓN*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICO
ÁREA: MÉCANICA

P R E S E N T A

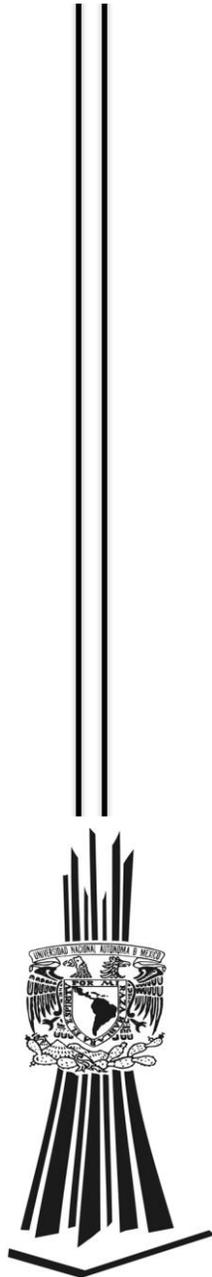
JESÚS DÍAZ GARCÍA

ASESOR

DR. J. GUADALUPE HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

CO-ASESOR

DR. ELIAS GRANADOS HERNÁNDEZ



FES Aragón

MÉXICO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Ramón y Mercedes por brindarme todo el apoyo necesario para lograr esta meta.

A Carolina por su cariño. Así como apoyo y tiempo dedicado a este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la gran oportunidad de formarme dentro de sus aulas.

Al Dr. Elías Granados Hernández por brindarme el apoyo y tiempo para realizar el proyecto.

Al Dr. J. Guadalupe Hernández Hernández por su amistad además de tiempo, paciencia y conocimientos dedicados para elaborar este proyecto y fungir como asesor de esta tesis.

CONTENIDO

RESUMEN	8
CAPÍTULO 1	9
1.0 INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 2	13
2.0 MARCO TEÓRICO	13
2.1 Biomasa.....	13
2.2. Definición de biogás	14
2.3. Producción de biogás.	15
2.3.1. Digestión anaerobia	17
2.3.1.2 Factores importantes en el proceso de digestión	19
2.4. Equivalencias del biogás como energético	21
2.4.1. Usos del biogás.....	22
2.4.2. Utilidad del biogás en el mundo	23
2.5. Biodigestor	24
2.5.1. Infraestructura de un biodigestor	24
2.5.2. Clasificación de biodigestores.....	26
2.5.2.1 Biodigestor continuo	26
2.5.2.2. Biodigestor discontinuo o de carga intermitente (Batch).....	33
2.5.2.3 Biodigestores semi-continuos.....	34
CAPÍTULO 3	36
3.0 OBJETIVOS	36
3.1. Objetivo general.	36
3.1.1. Objetivo específico.	36
CAPÍTULO 4	37
4.0 METODOLOGÍA DE DISEÑO	37
CAPÍTULO 5	42
5.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
5.1. Diseño y dimensionamiento de la planta de biogás para procesar residuos sólidos biodegradables.....	42
5.2 Descripción del equipo de proceso	47
5.2.1. Desmenuzador	47

5.2.2. Tanque de alimentación.....	47
5.2.3. Reactor Anaerobio.....	48
5.2.4. Equipos auxiliares.....	52
5.2.5. Tanque de descarga.....	54
5.2.6. Lecho de secado	55
5.3. Ventajas del tratamiento	57
5.4 Análisis económico.....	61
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFIA	69
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	72

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1. Composición del biogás en porcentajes.....	15
Tabla 2.2. Contenido de Metano por materia prima y tiempo de fermentación.....	16
Tabla 2.3. Rangos de temperatura por tipo de bacteria.....	20
Tabla 2.4. Características del biogás y comparación con otros gases.....	21
Tabla 5.1. Masa de residuos sólidos biodegradables producidos en la FES Aragón y municipio para el dimensionamiento de la planta de biogás.....	43
Tabla 5.2. Clasificación de los desechos según software empleado en la simulación.....	45
Tabla 5.3. Dimensiones del tanque de alimentación para diferentes cargas orgánicas.....	47
Tabla 5.4. Dimensiones del biodigestor tipo laguna para diferentes cargas orgánicas de alimentación.....	50
Tabla 5.5. Dimensiones del tanque de descarga.....	55
Tabla 5.6. Dimensiones del lecho de secado de lodos.....	56
Tabla 5.7. Reducción de emisiones contaminantes.....	58
Tabla 5.8. Producción de fertilizante.....	58
Tabla 5.9. Producción de biogás.....	59
Tabla 5.10. Equivalencias energéticas en diferentes unidades.....	60
Tabla 5.11. Inversión inicial del biodigestor tipo laguna.....	63
Tabla 5.12. Ingresos anuales.....	63
Tabla 5.13. Factores económicos.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso de producción de biomasa.....	13
Figura 2.2. Proceso anaerobio alimentado con distintos sustratos orgánicos.....	16
Figura 2.3. Etapas de la fermentación anaerobia.....	18
Figura 2.4. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía.....	22
Figura 2.5. Principales componentes de un biodigestor.....	26
Figura 2.6. Biodigestor continuo.....	27
Figura 2.7. Biodigestor modelo chino.....	28
Figura 2.8. Modelo Hindú de campana flotante.....	29
Figura 2.9. Biodigestor tipo balón o salchicha.....	31
Figura 2.10. Biodigestor discontinuo diseño batch o intermitente.....	34
Figura 5.1.a Composición de césped.....	43
Figura 5.1.b Composición de desechos de cocina.....	44
Figura 5.1.c Composición de los lodos sedimentados.....	44
Figura 5.2. Construcción de la estructura del biodigestor tipo laguna.....	51
Figura 5.3. Laguna cubierta de polietileno de alta densidad.....	52
Figura 5.4. Colocación de equipos auxiliares al interior de la laguna.....	53
Figura 5.5. Sistema de agitación en una planta.....	54
Figura 5.6 Vista lateral del tanque de descarga vacío.....	55
Figura 5.7. Vista panorámica del lecho de secado de lodo.....	57

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 5.1. Diagrama de flujo de proceso del tren de tratamiento de la planta de biogás.....	46
Esquema 5.2. Corte A-A tubería de alimentación y descarga.....	48
Esquema 5.3. Sistema de agitación y bomba de descarga de lodos.....	53

ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 5.1. Tiempo de retorno de inversión.....	65
---	----

RESUMEN

Los constantes cambios climáticos ocasionados por el uso excesivo de combustibles fósiles, hace necesaria la implementación de nueva tecnología que favorezca al medio ambiente. Este trabajo, tuvo como objetivo principal analizar la viabilidad técnica económica de una planta productora de biogás en la Facultad de Estudios Superiores Aragón ubicada en Cd. Nezahualcóyotl. Edo. de México, empleando la materia orgánica biodegradable que se genera diariamente en dicha institución. La planta de biogás fue dimensionada a través de la simulación en el Programa de Computo “Biodigestor Pro” versión 3.5, desarrollado en Alemania por Aqualimpia Beratende Ingenieure, empleando a tres sustratos biodegradables (césped y arboles podados, desechos de cocina y lodos sedimentados). El estudio se realizó pensando en dos posibilidades: 1) Considerando únicamente los residuos sólidos biodegradables que se generan en la FES-Aragón. (350 Kg/día). 2) Tomando en cuenta residuos orgánicos tanto de la FES-Aragón como del propio municipio para una carga orgánica de 5,000 Kg/día.

Los resultados obtenidos en la simulación de la planta de biogás, indicaron que es necesario incrementar la carga de materia orgánica alimentada a la planta de biogás de 350 a 5, 000 Kg/día para que el proyecto sea rentable desde el punto de vista técnico y económico con una tasa de retorno a tres años, lo que resulta totalmente factible para la Institución, ya que los ingresos serían de \$ 1, 435, 460.00 pesos por año y con esto, se dejarían de emitir al ambiente 1,302 toneladas de CO₂, reduciendo además, los problemas efecto invernadero.

El resto de la materia orgánica biodegradable, se recomienda sea adquirida de las zonas aledañas a la FES-Aragón, principalmente de los mercados y sitios de comida.

CAPÍTULO 1

1.0 INTRODUCCIÓN

La tesis consta de cinco capítulos; en el capítulo 1, se aborda el tema de la contaminación ambiental, describiendo los efectos que esta tiene en el planeta y en la salud humana seguido de las fuentes energéticas en México así como los sectores más contaminantes, con lo que se pretende mostrar la problemática ambiental que existe actualmente, posteriormente se detallan algunos ejemplos de biodigestores como una opción para disminuir la contaminación ambiental. En el capítulo 2, se plantea la información bibliográfica que da sustento científico a la producción de biogás, mediante biodigestores anaerobios. En el capítulo 3, se muestran los objetivos del proyecto con los cuales se pretende resolver una parte de la problemática de los residuos orgánicos generados en la FES-Aragón. En el capítulo 4, se describe la metodología empleada para el dimensionamiento de la planta de biogás y en el capítulo 5, se presenta un análisis de resultados obtenidos por las herramientas empleadas (software) sobre el dimensionamiento de los equipos que componen la planta de biogás y finalmente la parte de conclusiones y recomendaciones.

El calentamiento global provocado por el aumento gradual de las temperaturas en la atmósfera y los océanos en la tierra, es producto del aumento de las concentraciones de los gases efecto invernadero, que son obtenidos por el uso excesivo de combustibles fósiles para satisfacer las múltiples actividades humanas. Estos gases tienen la cualidad de atrapar el calor y evitar que este se disperse al espacio, provocando un calentamiento en el planeta. Algunos ejemplos de ellos son: bióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (NO), gases de hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluro de azufre (SF_6) y metano (CH_4) entre otros [Hernández, 2001]. Estos gases dispersos en el ambiente alteran el entorno y producen impactos negativos sobre el medio, la economía y la sociedad de cualquier país. La solución al problema y sus consecuencias deben interesar a todos los países, desarrollados y en vías de desarrollo no importando sus diferentes condiciones y

capacidades [Estrada, 2001]. En el caso de México, la Secretaría de Energía reportó que en el año 2011, el 64.1% de la energía consumida a nivel nacional proviene del petróleo, el 22.9 % del gas natural y el 6.9 % de energías renovables, (de estas el 1.7 % es geoenergía, solar y eólica; el 1.4 % hidroenergía y el 3.8% de biomasa y biogás) y el resto proviene del carbón (3.1 %) y condensados (1.1 %). Esto muestra que México, es un país altamente dependiente de los combustibles fósiles por ser su principal fuente energética, teniendo como consecuencia un deterioro ambiental grave. Se estima que el resultado de la combustión de estos gases, produce alrededor de un 69.3 % de emisiones de bióxido de carbono (CO_2), 26.4 % de metano (CH_4), 2.9 % de óxido nitroso (NO) y 1.4 % de gases halogenados, [INE, 2012]. Por lo que es necesario disminuir el consumo de combustibles fósiles, a través del uso de nuevas tecnologías que usen energías alternas. Una de estas fuentes de energía renovable, es el uso del biogás, obtenido a partir de desechos sólidos orgánicos biodegradables productores del gas metano, este gas posee un poder de calentamiento 23 veces más alto que el CO_2 [IPCC, 2001], sus emisiones en la atmósfera provienen de diferentes fuentes alternas, como la biodegradación anaerobia, la digestión rumiante, la quema de biomasa, etc.; estas fuentes naturales representan el 40 % de las emisiones de metano total y el resto (60 %) de la actividad humana [Global Methane Initiative, 2013].

Los principales sectores emisores de gas metano en México, son el sector agrícola y la colecta de los desechos orgánicos urbanos. Este gas es el principal componente del biogás, formado a través de la descomposición anaerobia de desechos orgánicos, que proporciona un recurso energético que es desaprovechado en algunos casos y liberado a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global, incluso se estima que en zonas urbanas del país, cada familia de 5 personas en promedio, genera alrededor de un metro cubico de basura por mes; lo que da como resultado una producción de tres millones de metros cúbicos mensualmente. Esta cantidad de basura podría llenar tres veces un espacio igual al Estadio Azteca, del cual el 60 % está conformado por residuos orgánicos que al descomponerse generarían emisiones altamente contaminantes a la biosfera, por su elevado contenido de metano.[Ávila 2009].

El tratamiento de los desechos orgánicos a través de biodigestores anaerobios, hace posible la producción de gas metano como fuente principal de energía dentro del biogás [Moncayo, 2013], aprovechando su potencial energético en lugar de dejarlo ir a la atmósfera como un gas contaminante. Se ha reportado que en México, la producción de energía a partir del biogás fue de 1.3 petajoules en el año 2010 y aumentó a 1.47 petajoules en el año 2011, esto representó un incremento de la producción de biogás del 13.35 % según datos reportados por la Secretaría de Energía, aunque su producción es pequeña, esta podría ir aumentando con la implementación de nuevas plantas de tratamiento anaerobias en lugares donde la recolección de materia orgánica biodegradable sea abundante y sin costo alguno, por ejemplo los residuos sólidos orgánicos urbanos (RSU) y domésticos.

Para aumentar la producción de biogás a través de los residuos orgánicos evacuados en el ambiente, es necesario resolver problemas de ingeniería y establecer mecanismos que transformen los residuos orgánicos biodegradables en compuestos simples como CO_2 y CH_4 . Esto minimizaría los depósitos clandestinos y la disposición inadecuada.

En este trabajo se busca aprovechar los residuos sólidos orgánicos biodegradables, producidos en la propia FES Aragón, con el fin de mejorar el ambiente, reducir las emisiones de gases efecto invernadero a la atmósfera, mejorar las propiedades físicas, del suelo, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad, la capacidad de infiltración de agua y la capacidad de intercambio catiónico, al producir fertilizantes con alto contenido en nutrientes. La digestión anaerobia es una tecnología ampliamente usada para resolver estos causados por los desechos orgánicos biodegradables debido a que usa como materia prima a estos desechos.

Como ejemplo de este proceso podemos citar el proyecto llamado “Humanure Power Project” desarrollado en la India, que a partir de la digestión de la biomasa produce gas metano para posteriormente transformarlo a energía eléctrica y así iluminar ciudades. [Dell Social Innovation Challenge, 2012]. Otro ejemplo de uso de biogás producido a partir de biodigestores, se presenta en Bolivia, donde se menciona que una familia de dos adultos y cuatro niños, producen 1.6 Kg de materia orgánica biodegradable. Si la descarga de agua es de tres litros, significa que los seis miembros de la familia descargan 18 litros de agua por día, que mezclados con los residuos sólidos orgánicos, da un total de 19.6 litros por día que

se introducen al biodigestor, en este manual proponen un tiempo de retención de 100 días y una posible producción de biogás de cerca de 80 litros por día.

Es por ello que en este trabajo, se propone el análisis completo de una planta productora de biogás para la FES Aragón alimentada con residuos sólidos biodegradables.

CAPÍTULO 2

2.0 MARCO TEÓRICO

2.1 Biomasa

La biomasa, se refiere a la materia orgánica de origen animal o vegetal, que al ser degradada por microorganismos biológicos produce biogás (bioenergía), Ver Figura 2.1. La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol a través del proceso de la fotosíntesis, donde las plantas absorben la energía lumínica a través de células llamadas cloroplastos que contiene una sustancia conocida como clorofila, que es el pigmento que absorbe la energía luminosa del sol.

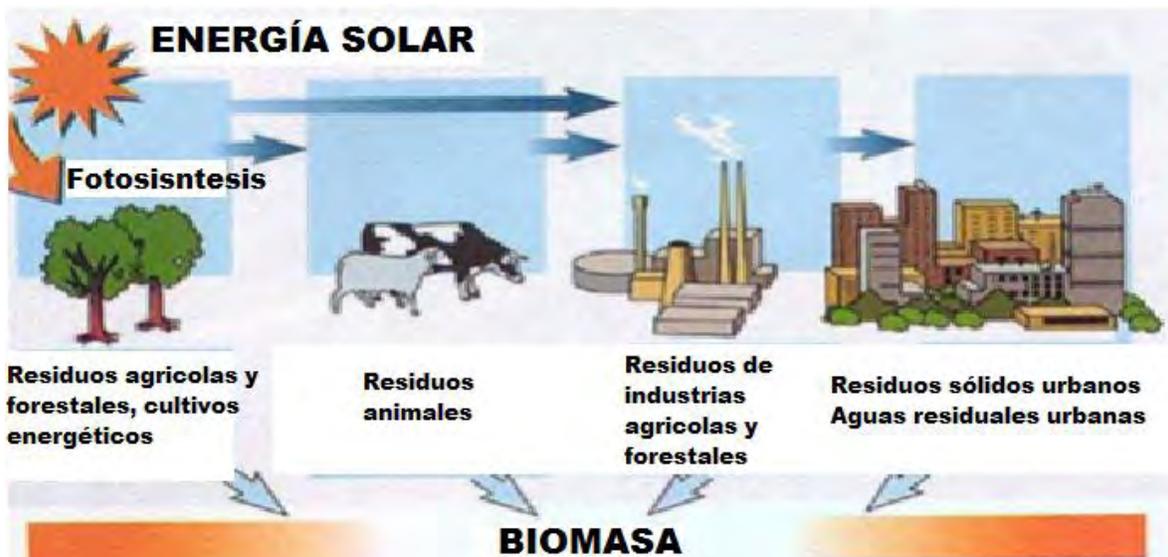


Figura 2.1. Proceso de producción de biomasa [Fuente: Ávila, 2009]

La energía de biomasa o bioenergía, es un término que se le da a la energía almacenada en compuestos orgánicos transformada en energía útil y uso final [Carless, 1995].

Existen dos tipos básicos de conversión de la bioenergía: la térmica, que son aquellos procesos que se producen debido a la interacción de calor en las reacciones químicas [Domínguez, 2004] y procesos bioquímicos en los cuales existen reacciones químicas llevadas a cabo por microorganismos. Los productos finales pueden ser combustibles líquidos o gaseosos (biogás) [Carless, 1995]. La digestión anaerobia y la fermentación son los procesos usados para transformar bioquímicamente en energía a la biomasa. Desde 1776 Alessandro Volta, reporta los primeros datos que hacen referencia a la digestión anaerobia y a la formación del gas combustible (metano) en pantanos, lagos y aguas estancadas. En 1821, Amadeo Avogadro descubre la ecuación del gas metano y la primera planta de digestión anaerobia se construye en Bombay, India en 1859. A partir de ahí, se comenzó la producción de cientos de digestores en toda la India. En el año de 1868, Pierre Jacques Antoine Bechamp precisó las reacciones como parte de un proceso microbiológico. En el año de 1884, Louis Pasteur realizó investigaciones sobre biogás producido por los residuos animales y propuso su uso para calefacción y alumbrado público.

2.2. Definición de biogás

El biogás, es una mezcla de gases derivada de la digestión anaerobia compuesta principalmente por metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2) y en menor proporción distintos gases, que se comportan como impurezas: agua (H_2O), sulfuro de hidrógeno o ácido sulfurico (H_2S), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. (Ver Tabla 2.1). Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final [IDAE, 2007; Moncayo, 2013; Unión Europea, 2010].

Tabla 2.1. Composición del biogás en porcentajes [Fuente: Unión Europea, 2010]

Compuestos del biogás (%)	
Metano, (CH ₄)	50 – 75
Bióxido de carbono, (CO ₂)	25 – 45
Vapor de agua, (H ₂ O)	1 – 2
Monóxido de carbono, (CO)	0 - 0.3
Nitrógeno, (N ₂)	0 – 3
Sulfuro de hidrógeno, (H ₂ S)	0.1 - 0.5
Oxígeno, (O ₂)	0.1 – 1

La proporción de gas metano presente en el biogás depende de la materia prima empleada para la alimentación del reactor anaerobio.

2.3. Producción de biogás.

La producción del biogás comienza con la recolección de desperdicios agrícolas, industriales y urbanos. Las bacterias descomponen la biomasa y crean un biogás, que varía su contenido de metano según la materia que se fermente, debido a que los principales componentes de la biomasa (carbohidratos, lípidos y proteínas) se encuentran en una proporción variable de acuerdo al origen de la biomasa [De Juana, 2003], ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Contenido de metano por materia prima y tiempo de fermentación. Fuente: [Camps, 2008]

Material	Tiempo de fermentación (días)	Contenido CH₄ (%)
Estiércol vacuno	115	80
Estiércol cerdo	115	81
Paja 30 mm longitud	120	80
Paja 2 mm longitud	80	81
Mata de papa	50	75
Hojas de remolacha	14	85
Hierba	24	84

En la figura 2.2 se presenta el diagrama alimentado con diferentes sustratos [Lansing, 2008].

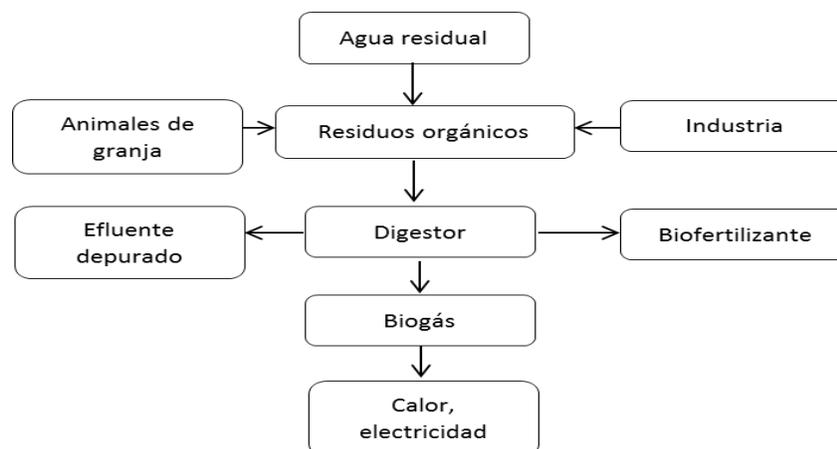


Figura 2.2. Proceso anaerobio alimentado con distintos sustratos orgánicos [Fuente: IDAE, 2007]

2.3.1. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia, es un proceso biológico en el cual la materia orgánica se descompone por medio de microorganismos en productos gaseosos en ausencia de oxígeno. Este proceso se puede comparar con la digestión que ocurre en los estómagos de los animales donde de manera similar se degrada el alimento. La digestión anaerobia es un proceso muy complejo y se lleva a cabo a través de cuatro fases secuenciales realizadas por diferentes grupos de microorganismos en cada etapa, (Ver Figura 2.3.) [IDAE, 2007; Lansing, 2008].

- Fase 1: Hidrólisis

Es el primer paso para degradar la materia orgánica compleja. En esta etapa las bacterias hidrolíticas descomponen macromoléculas orgánicas despolimerizándolas en monómeros más sencillos como azúcares simples, ácidos grasos o aminoácidos. Esta acción la realizan un grupo de bacterias que hidrolizan las moléculas solubles en agua como grasas, proteínas y carbohidratos, en esta etapa existe producción de CO_2 [Lansing, 2008].

- Fase 2: Acidogénesis

Los compuestos producidos en la etapa anterior son asimilados por bacterias acidogénicas para producir ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$), hidrógeno (H_2) y CO_2 , ácidos grasos de cadena corta y ácidos grasos volátiles AGV's. Este paso va acompañado de producción de gases como, hidrógeno molecular (H_2), pequeñas cantidades de amoníaco (NH_3) y rastros de ácido sulfhídrico (H_2S). También se producen alcoholes. Este paso elimina el oxígeno molecular para generar el alimento de las bacterias productoras de metano [Abbasi, 2012].

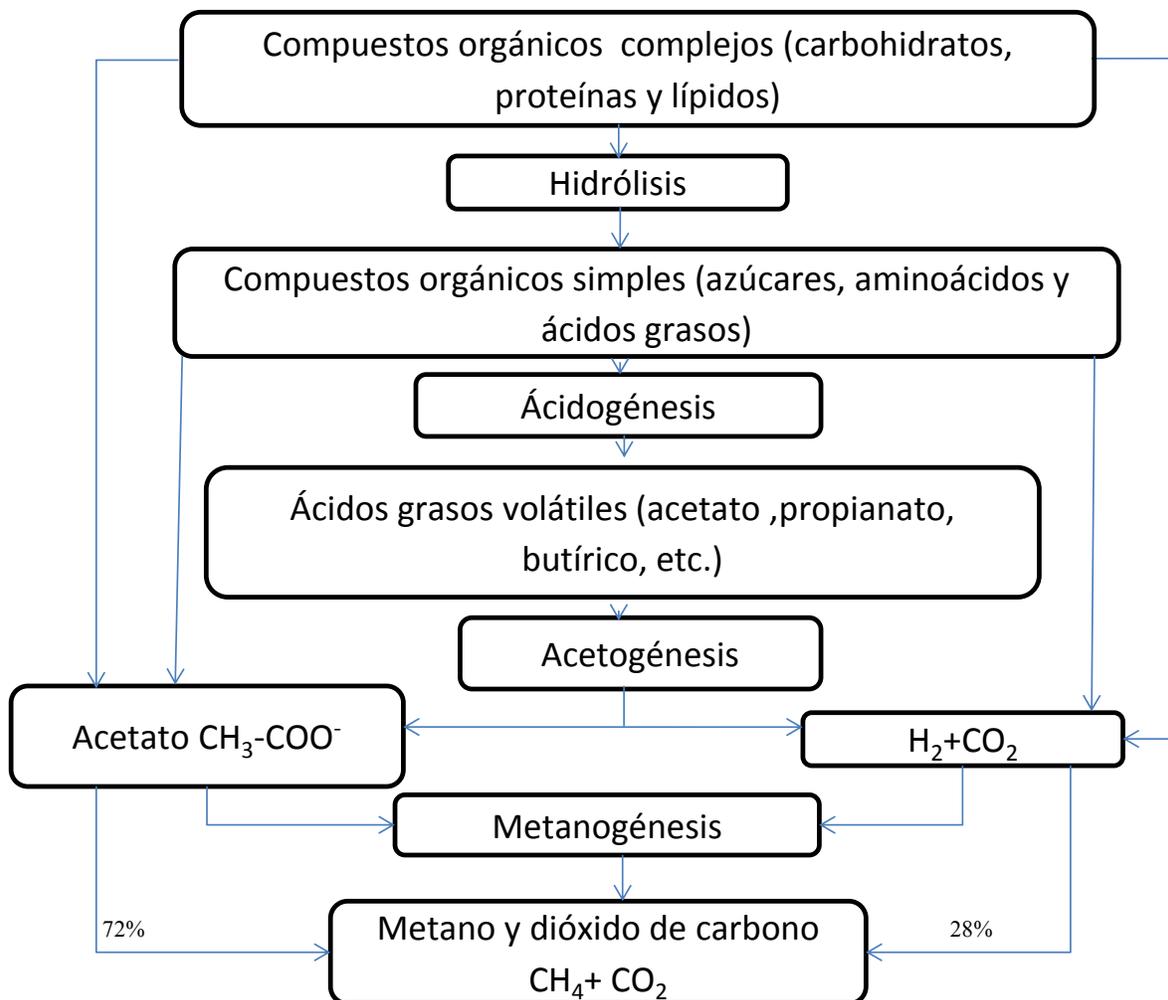


Figura 2.3. Etapas de la fermentación anaerobia. [Fuente: Unión Europea, 2010].

- Fase 3: Acetogénesis

Se realiza por un grupo de bacterias denominadas acetogénicas, que realizan la degradación de los ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo acetato ($C_2H_4O_2$), llevándolos al grupo acético (CH_3-COOH) y liberando productos como H y CO_2 que son los sustratos de las bacterias metanogénicas [Moncayo, 2013, Abbasi, 2012].

- Fase 4: Metanogénesis

Es la última parte del proceso, donde las bacterias metabolizan el $C_2H_4O_2$, H^+ y CO_2 , dando lugar a la formación de metano como producto final. Distinguiéndose dos tipos de bacterias, las que degradan el $C_2H_4O_2$ a CH_4 y CO_2 llamadas bacterias metanogénicas acetoclasicas y las que reducen el CO_2 con H^+ a CH_4 y H_2O , conocidas como bacterias metanogénicas hidrogenofílicas. Encontrando alrededor del 70% de CH_4 en la degradación de $C_2H_4O_2$ [Toprak, 1994].

2.3.1.2 Factores importantes en el proceso de digestión

Para llevar a cabo el proceso de digestión existen varios factores físicos y químicos que condicionan el proceso, estos son:

- *Nutrientes*. Se necesita una fuente de carbono, energía y una serie de minerales (nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio). En el medio a digerir debe de haber una relación adecuada para el desarrollo de la actividad bacteriana, por lo general esta relación se encuentra de manera apropiada en los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), residuos ganaderos y lodos de depuración de agua [Unión Europea 2010].
- *Relación carbono nitrógeno (C:N)*. La relación C:N es una concentración de nutrientes para el proceso de digestión anaerobia que se encuentra en el influente. Cuando su relación es muy alta ($C:N > 30:1$), existirá en el sistema una gran concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV's), que inhibirán las etapas microbiológicas del sistema. En caso contrario ($C:N < 20:1$), la alta concentración de compuestos nitrogenados, también inhibirá la producción de biogás [SEMARNAT, 2010]. Por lo anterior, para este tipo de procesos, se considera una relación entre 20:1 y 30:1, siendo la óptima 25:1. Como en el caso de los residuos ganaderos, los lodos de depuración de aguas y desechos orgánicos de cocina, los cuales presentan nutrientes en las proporciones adecuadas [SEMARNAT, 2010].

- *Temperatura.* Los procesos anaeróbicos dependen de la temperatura. Este es un parámetro muy importante ya que determina la velocidad de digestión anaerobia [Varnero, 2011], (Ver Tabla 2.3). El intervalo mesofílico es el más utilizado, pese a que en el termófilo es donde se tiene la mayor producción de biogás. Esto se debe a la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termófilas a las pequeñas variaciones térmicas, lo que implica un mayor control del sistema [Unión Europea, 2010, Lansing, 2008].

Tabla 2.3. Rangos de temperatura por tipo de bacteria [Fuente Unión Europea, 2010].

Bacterias	Rango de temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20°C	± 2°C/ hora
Mesofílicas	Entre 20°C y 40°C	± 1°C/hora
Termofílicas	Más de 40°C	±0.5°C/hora

- *pH.* Es el parámetro de control más importante en cada fase del proceso, debido a que éste varía con mucha frecuencia por la acción de los microorganismos, sin embargo el pH óptimo de los microorganismos hidrolíticos está entre 7.2 y 7.5, para los microorganismos acetogénicos entre 7.0 y 7.2 y para los microorganismos metanogénicos entre 6.5 y 7.5. Para un buen rendimiento en la producción de biogás, debe ubicarse en un rango de 6.5 y 7.5 de manera general [SEMARNAT, 2010; Vinoth, 2005].
- *Tiempo de retención (TR).* Es el tiempo que el sustrato está sometido a la acción de los microorganismos en el reactor [Unión Europea, 2010], se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. El TR está ligado a dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo.

La selección de una temperatura mayor implicará un tiempo más bajo esto también disminuye el volumen del digestor [Moncayo, 2013].

- *Masa seca y masa volátil (MS, MV)*. La masa seca se define como la cantidad de sólidos que contiene la biomasa, esta es la parte seca. La masa volátil, es el volumen de masa orgánica que contiene la biomasa, este porcentaje es el que produce biogás, ya que lo demás es humedad y material inorgánico [Moncayo, 2013; Varnero, 2011].

2.4. Equivalencias del biogás como energético

El poder calorífico del biogás esta entre 4,700 a 5,500 kcal/m³ ó 5-7 kWh/m³ dependiendo de la cantidad de CH₄ presente y puede generar una cantidad de energía calorífica de 19.7 MJ/m³ a 23 MJ/m³ (Ver Tabla 2.4.) [Martí, 2008].

Tabla 2.4. Características del biogás y comparación con otros gases [Fuente: Moncayo, 2013].

Características del biogás y comparación con otros gases						
Tipo de gas	Unidad	Biogás	Gas natural	Propano	Metano	Hidrógeno
Poder calorífico	kWh/m ³	6	10	26	10	3
Peso específico	Kg/m ³	1.25	.7	2.01	0.72	0.09
Relación a la densidad del aire	-----	0.9	0.54	1.51	0.55	0.07
Temperatura de encendido	°C	700	650	470	600	585
Contenido de oxígeno para explotar	Vol.- %	6-12	4.4-15	1.7-10.9	4.4-16.5	4-7

La equivalencia energética del biogás varía en función de la cantidad de metano presente, por ejemplo un metro cúbico de biogás compuesto de 70% de metano es equivalente a 800 mL de gasolina (Ver Figura 2.4.).

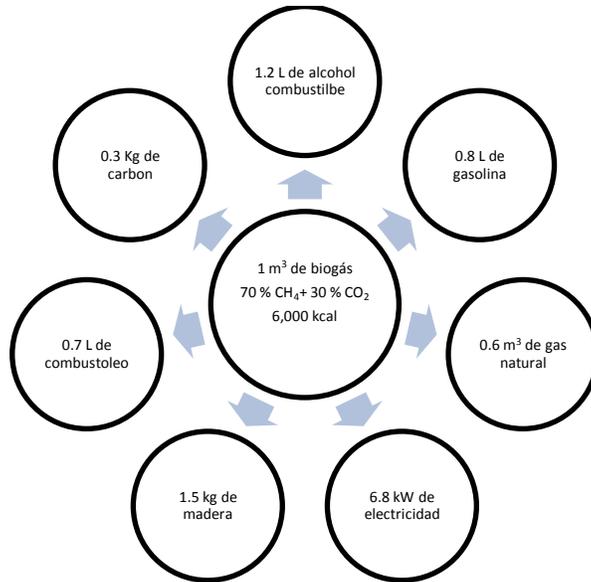


Figura 2.4. Equivalencias de biogás en diferentes fuentes de energía [Fuente: Martí, 2008]

2.4.1. Usos del biogás

El biogás se puede utilizar para la generación de vapor, generación de energía eléctrica, combustible para autos y energía térmica [Varnero, 2011], esta última posee varios usos: calefacción de agua o edificios, cocinas y lámparas de gas así como calentar el reactor anaerobio.

Para la generación de energía eléctrica se usa en motores de combustión interna, acoplados a un generador eléctrico, entre los motores que se pueden usar son motores diésel con una mezcla de hasta 80% de biogás y 20% diésel y motores a gasolina, en motores diseñados especialmente para biogás dan mejor rendimiento [Moncayo, 2013]. De la misma manera para generadores de vapor, deben ser construidos para operar con biogás.

2.4.2. Utilidad del biogás en el mundo

El uso del biogás como combustible ha ido incrementándose en el mundo, tenemos el caso de la Unión Europea que en Junio de 2006 comenzó un proyecto de agro biogás en Aarhus, Dinamarca. En este proyecto participan 24 socios de la Unión Europea que estudian la producción de biogás a partir de desechos animales y vegetales renovables. En Alemania la mayor parte de instalaciones agropecuarias poseen sistemas para aprovechar los desechos orgánicos. El continente asiático ha sido el que más instalaciones de biogás ha construido, por ejemplo en China el 70 % del combustible usado en las zonas rurales para uso doméstico proviene de descomposición de desechos orgánicos, esto contribuyó a desarrollar el centro de investigación en biogás para Asia y Pacífico [Moncayo, 2013; Unión Europea, 2010; Hilkiä, 2007].

En México existen proyectos, como lo es la planta en construcción de Atotonilco la cual contará con biodigestores y será la más grande del país, así como los proyectos de biogás en rellenos sanitarios como el caso del bordo poniente, también existen Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) que cuentan con equipos para digestión anaerobia.

El uso de biogás en universidades, es una opción clara para el beneficio de la comunidad del campus. En Ghana por ejemplo, se realizó un proyecto para ser implementado en cuatro universidades. En las cuales estiman que la población de las cuatro universidades es de 100,313 estudiantes, cuando se encuentra en periodos de actividad y de 20,903 en tiempo vacacional, el estimado generado de aguas residuales es de 1,379.9 m³ y de 327.8 m³ respectivamente. Este estudio revela un potencial considerable de biogás de cerca de 815,109 m³ esto equivalente a 4.891 MWh de energía, que remplazaría alrededor de 4,532 toneladas de madera o 326.4 toneladas de gas L.P., este estudio propone la viabilidad de realizar acciones similares en otras universidades para ayudar a mitigar el efecto de los desechos orgánicos que no son tratados [Arthur, 2011].

2.5. Biodigestor

El biodigestor, es la estructura física o reactor que favorece el proceso natural de degradación anaerobia y facilita la estabilización de la materia orgánica contenida en los residuos y la generación de biogás [Silva, sin año].

Debe ser hermético para evitar que el oxígeno presente en la atmósfera interfiera con el proceso anaerobio e impida fugas del biogás producido, también, debe de estar aislado térmicamente para evitar cambios bruscos de temperatura y contar con un sistema de agitación que mantenga una concentración uniforme de microorganismos [Varnero, 2011].

Así mismo se requiere una infraestructura básica para alimentación y descarga del material en el biodigestor.

2.5.1. Infraestructura de un biodigestor

En la Figura 2.5, se muestra un biodigestor con sus componentes principales de alimentación y descarga, así como la recolección de biogás. Los más importantes se describen a continuación:

- *Canal de entrada*: es la tubería que hace posible el ingreso del influente al reactor. El material de fabricación es de PVC, HDPE, PE, acero galvanizado o acero inoxidable, su diámetro varía de acuerdo a las características de la biomasa con la cual se alimenta al reactor, sin embargo, se considera un mínimo de 100 mm aunque esto puede ocasionar pérdidas por fricción y obstrucción en caso de que la biomasa sea de consistencia fibrosa.

En las tuberías de conducción se deben instalar cajas de revisión en los puntos donde se encuentren cambios de dirección, con el fin de destapar la tubería en caso de obstrucciones

- Reactor: es el dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de materia orgánica, debe ser hermético para evitar la entrada de oxígeno y evitar fugas de biogás. Su función es proveer un “hogar” a las bacterias encargadas de la biodegradación y una estructura para colocar los equipos auxiliares.
- Cúpula de biogás: parte superior del reactor, donde se almacena el biogás de manera temporal. Sus principales funciones son almacenar el gas en caso de desperfectos en el depósito final y proveer una presión positiva para el flujo del gas combustible al depósito final.
- Canal de salida: tubería donde sale la materia orgánica ya digerida (efluente), posee las mismas características que el canal de entrada.
- Válvulas: evitan el retorno de gas, cuando en el interior del reactor se encuentran presiones negativas, disminuye el riesgo de explosiones; también sirve para realizar operaciones de mantenimiento en la tubería de conducción de gas por secciones.
- Filtros: sirve para remover impurezas del biogás como humedad, ácido sulfúrico, entre otros, estas impurezas pueden dañar los equipos de generación de energía eléctrica y aumentar los costos por conceptos de mantenimiento.
- Agitadores: se usan para tener mezclas homogéneas de bacterias dentro del reactor y evitar la formación de capas superficiales duras en forma de espuma que impide la salida del gas. Dentro de estos equipos tenemos los agitadores mecánicos y neumáticos. Los equipos mecánicos consisten en paletas que agitan la mezcla al interior del biodigestor y los equipos neumáticos, los cuales inyectan el biogás a presión en fondo del reactor para que la mezcla no permanezca estática
- Bombas: sirven para remover el material ya digerido que se encuentra en el reactor. El dejar este material lodoso dentro del reactor provocaría una disminución en su volumen lo cual ocasionaría un menor rendimiento.

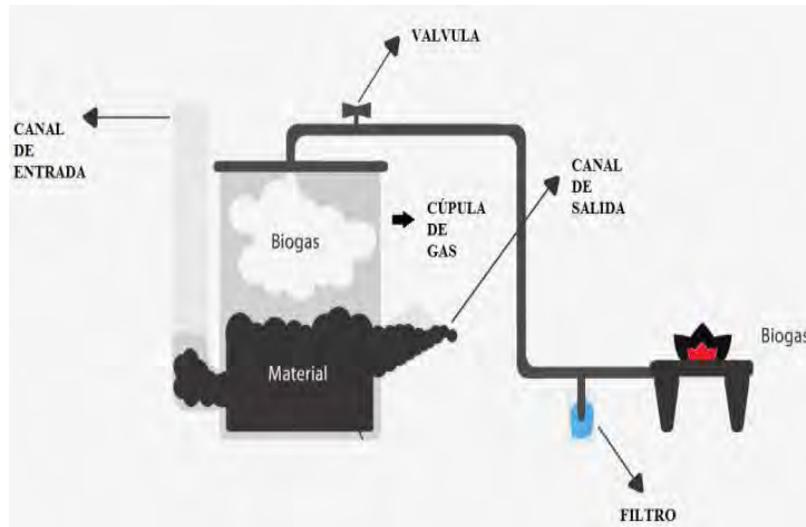


Figura 2.5. Principales componentes de un biodigestor.

2.5.2. Clasificación de biodigestores

Los biodigestores se pueden clasificar en continuos, discontinuos y semicontinuos de acuerdo a su régimen de carga.

2.5.2.1 Biodigestor continuo

Estos biodigestores son perfectos para el tratamiento de agua residual, granjas agropecuarias a nivel industrial y tratamiento de residuos urbanos biodegradables, este tipo de digestores permite controlar la digestión de manera muy precisa, debido al control de las variables involucradas en el proceso.

Se les da mantenimiento regularmente en pequeñas cantidades. El diseño continuo es el más común y apropiado para instalaciones grandes.

El biodigestor continuo tiene tres orificios; uno central que es cerrado después de hacer la carga inicial y abierto después para limpiar el biodigestor (descarga total); un segundo orificio se usa para cargarlo diariamente en cantidades pequeñas con biomasa nueva; y un tercer orificio el cual permite sacar el material degradado periódicamente. El diseño de este

biodigestor es favorable para que sea llenado con materiales blandos como el estiércol. La Figura 2.6 muestra el esqueleto de un biodigestor continuo.

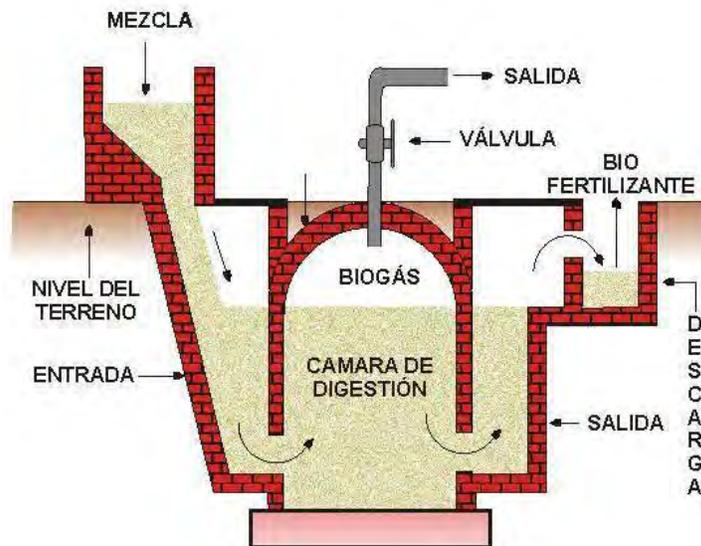


Figura 2.6. Biodigestor continuo

Este tipo de biodigestores tiene como ventajas que se puede controlar la digestión que es requerida por medio de la cantidad de biomasa depositada diariamente, la carga y descarga del biodigestor no requiere de operaciones especializadas. Sin embargo, una inadecuada operación o alimentación puede inducir a una baja concentración de sólidos que se pueden depositar adentro.

Entre los biodigestores continuos existen varios tipos; los más comunes son el biodigestor chino de estructura fija, (Ver Figura 2.7), el tipo hindú de campana flotante, (Ver Figura 2.8) y el tipo balón de estructura flexible, (Ver Figura 2.9). El biodigestor chino es el más sencillo; el diseño Hindú incorpora una campana flotante en la parte superior de la cámara de almacenamiento del biogás, con la función de aplicar presión sobre el biogás y facilitar su extracción; el biodigestor tipo balón emplea una bolsa larga donde se almacena el biogás.

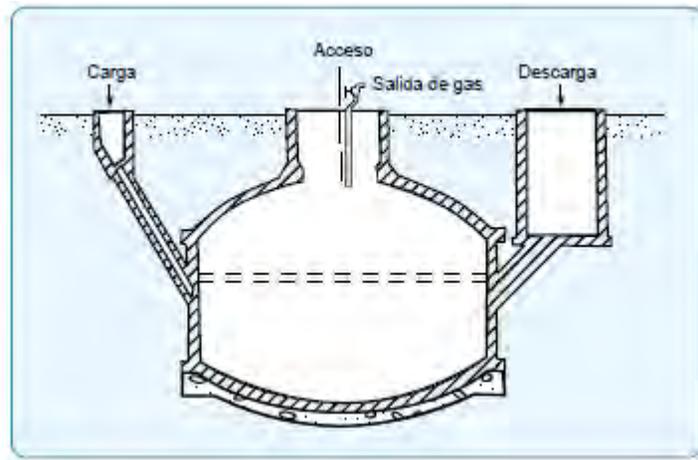


Figura 2.7. Biodigestor modelo chino [Fuente: Varnero, 2011].

Modelo chino. Es el modelo más extendido, debido a su durabilidad, fácil manejo, funcionalidad y seguridad. Este diseño se originó en China y está ampliamente difundido ahí. Se trata de una cámara cerrada con sus respectivas cámaras de carga y descarga. La estructura puede ser construida de concreto armado, ladrillos, piedra u hormigón y las paredes internas permeabilizadas con diferentes métodos (como aplicación de cemento mezclado con porcelana) para evitar fugas de líquido. Su vida útil es mayor a 15 años con un buen mantenimiento. La principal característica de este equipo es la alta producción de abono. Esta clase de digestor (cúpula o campana fija) almacena solamente un pequeño volumen del biogás generado en el interior, por lo que necesita de un contenedor diferente construido para este gas producido (gasómetro).

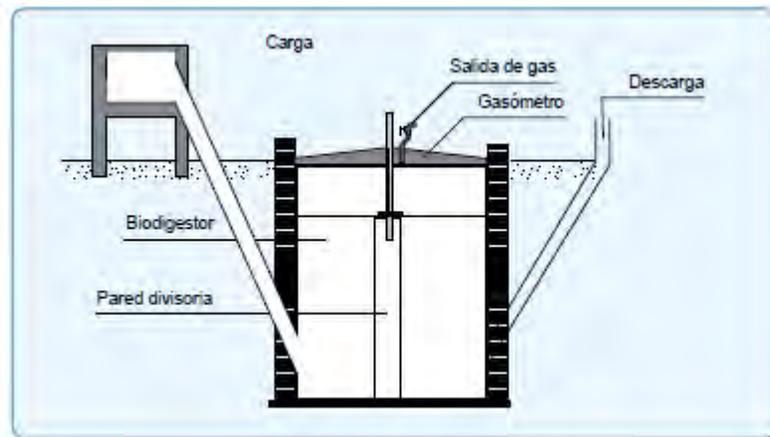


Figura 2.8. Modelo Hindú de campana flotante [Fuente: Varnero, 2011].

Modelo hindú. Consiste de un reactor cuya estructura vertical es de ladrillo tanto paredes como fondo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón, una campana o cúpula flotante (flotando en el líquido debido al biogás que retienen en su interior) de metal (como acero) o material resistente a la corrosión como plásticos reforzados, esta campana sube y baja dependiendo del volumen de biogás que se va produciendo y se almacena en esta interface, por ello requiere de una varilla guía central o rieles laterales que eviten el rozamiento contra las paredes del reactor, dos zonas definidas conectadas al reactor; una para la carga de materia orgánica y otra para la descarga de bio-abono, una cámara hermética en la cual se generan condiciones de degradación anaeróbicas de la materia orgánica formando biogás y bio-abono (biol). Para permitir el ingreso de la materia orgánica y la salida del bio-abono, se dispone de dos tubos PVC conectados al tanque de almacenamiento (reactor) con la zona de carga y descarga funcionales gracias al principio de vasos comunicantes.

Un punto a favor es que no necesita de un contenedor externo (gasómetro) para almacenar el biogás generado, y el cual se mantiene a una presión relativamente constante gracias al movimiento vertical del domo conforme la presión aumenta o disminuye (estabilidad de presión entre 4 a 8 cm de agua) es muy ventajoso.

Existe la posibilidad de realizar modificaciones al modelo al cambiar la campana flotante

por una película de polietileno flexible y resistente, haciendo con esto que el costo baje y por ende sean más accesibles a la sociedad. El remplazo puede darse también por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) que es resistente a la corrosión. El reactor se alimenta continuamente como el biodigestor chino, a través de la tubería de entrada en intervalos de 12 o 24 horas.

Modelo Balón o Salchicha. La alta inversión que pedía construir un biodigestor de estructura resultaba una grave limitante para los pequeños granjeros por sus bajos ingresos. Esto motivó a unos ingenieros Taiwaneses en los años sesenta a diseñar un biodigestor con materiales flexibles más baratos, locales y accesibles. Primero se utilizó nylon y neopreno, sin embargo; estos demostraron ser algo costosos. Un paso mayor en los setenta era combinar PVC con el residuo de las refinerías de aluminio produciéndose así "el barro rojo PVC", y de ahí fue reemplazado por polietileno más barato y es el que se usa mayormente en América Latina, África y Asia. 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 optimizar el uso de excrementos pecuarios, reduciendo con ello presión en otros recursos naturales.

En este digestor, el biogás se va acumulando en la parte superior de la bolsa-reactor, parcialmente llena con materia orgánica en fermentación, la bolsa se va inflando lentamente con una presión baja.



Figura 2.9. Biodigestor tipo balón o salchicha (taiwanés)

Este biodigestor presenta los siguientes componentes:

Tubo de entrada: es un tubo de plástico de 20 a 30 cm de diámetro, que se utiliza para la inserción de materia orgánica y se dirige hacia adentro del reactor 15 cm de profundidad.

Reactor/Fermentador/bolsa de almacenamiento: Es el principal componente del biodigestor, el reactor, una bolsa en la que se almacena la materia orgánica y se dan los procesos de fermentación. Su tamaño varía dependiendo de la cantidad de material a fermentar, sin embargo este no puede ser muy grande, si hay necesidad de procesar mucho material, se procederá a conectar cámaras múltiples ya que no se pierde el área superficial eficiente necesaria, aunque puede resultar más costoso quitándole a este modelo su atractivo económico. El biodigestor debe estar aislado y contener un sistema de calentamiento y agitación. Para calentarse se recubre por encima de 60 cm con una estructura simple de plástico a modo de invernadero, ello prevendrá de cambios drásticos de temperatura y la mantendrá en el nivel deseable, así como también la construcción de una pared de tierra a los costados para evitar el enfriamiento del biodigestor, o semi-enterrarlo para el mismo fin, dependiendo de las condiciones del suelo. El biogás producido por el digestor puede almacenarse en un espacio añadido al digestor o conducirse independientemente a otra instalación de almacenamiento, cerca de la cocina, calefactor a usarse.

Tubo del afluente: el diámetro de este tubo plástico debe ser entre 10 a 15 cm, localizado por debajo del tubo de entrada en el lado opuesto del digestor, generando así una pendiente que proporcione el gradiente necesario para que fluya naturalmente y con facilidad a la hora de descargar el producto digerido, y también sumergido por debajo de 15 cm del fermentador, para así prevenir el escape del biogás a la hora de descarga.

Tubo de metano: este tubo, se ubica en la parte superior de la bolsa de almacenamiento de metano, de 5 cm de diámetro, se utiliza para transportar el biogás a su lugar de uso, el tubo debe estar conectado a una salida sumergida en agua para que absorba la humedad condensada producto de la metalogénesis y también es importantísimo que se conecte a un filtro absorbente de sulfuro de hidrógeno (producto también de la metalogénesis) que puede ser de virutas de hierro y otros materiales.

Dispositivo de seguridad: se utiliza para prevenir la ruptura del fermentador ocasionada por las presiones altas del biogás generado de la fermentación anaeróbica. Consiste en una botella plástica de al menos 10 cm de profundidad insertada al tubo de salida, cuando la

presión del digestor es mayor a la del agua (es decir, la presión mayor a 10 cm de agua), se liberará el biogás.

Tube de limpieza: el lodo sedimentado en el fondo del biodigestor debe ser removido cada dos años, esta tubería sirve para evacuar estos lodos por bombeo.

2.5.2.2. Biodigestor discontinuo o de carga intermitente (Batch)

Se cargan una sola vez y la biomasa digerida se retira cuando ya se ha dejado de producir biogás, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente. Este biodigestor tiene solamente un acceso de alimentación por donde se carga y se descarga. Se carga una vez hasta ser llenado completamente y posteriormente se pone en funcionamiento; la fermentación demora entre 2 y 4 meses (dependiendo del clima), se descarga cuando concluye la fermentación. Este diseño se emplea a escala chica, En este grupo el biodigestor es llenado por única ocasión (se cambia toda la biomasa hasta que se termine el biogás) con la biomasa por lo que no hay cambio de materia orgánica que haga sostenible la producción de biogás. Un metro cúbico de biomasa produce aproximadamente medio metro cúbico de biogás y como no se le hace recargas de biomasa no hay manera de que genere más cantidad. Este tipo de biodigestores tiene como ventajas y desventajas las siguientes.

Ventajas del biodigestor discontinuo:

- Puede procesar gran cantidad de materiales y puede recogerse en campos abiertos sin importar si tiene materia seca, esto no entorpece la operación del biodigestor.
- Puede llenarse con materiales secos que no absorben humedad (que floten en el agua) así como pasto, cascara de frutas y desechos de alimentos.
- No requiere atención diaria.

Desventajas del biodigestor discontinuo

- Cargar el biodigestor requiere de mucho trabajo y paciencia.
- La descarga del biodigestor también es un trabajo muy tedioso.



Figura 2.10. Biodigestor discontinuo diseño Batch o intermitente [Fuente: Garzón, 2010]

2.5.2.3 Biodigestores semi-continuos

Este tipo de reactores son adecuados para su aplicación en el medio rural por su pequeño volumen de diseño [Sosa, 1999], estos biodigestores se cargan o alimentan diariamente, con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total en el biodigestor, a la vez que se saca de la cámara de descarga un volumen igual de líquido, para con ello mantener el volumen constante. Se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante en los días. La producción de biogás es generalmente permanente, debido al constante suministro de nutrientes para las bacterias metanogénicas, responsables de generar el biogás. El único factor limitante sería la disponibilidad de agua, ya que la carga entrante debe ser en promedio de 1:4 material.

Entre los diseños más populares se encuentra el chino y el hindú los cuales pueden operar en ambos regímenes de carga (continuo o semicontinuo). Este tipo de reactores se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y produce una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación.

Estos biodigestores poseen las siguientes características:

- Hueco de entrada principal para el llenado total de material orgánico biodegradable (excepto en el Taiwan)
- Hueco de entrada de material
- Hueco de salida para remover periódicamente el material degradado: bioabono y biol
- Hueco de salida del biogás, o cúpula móvil, dependiendo del modelo.

Estos sistemas permiten retirar sustrato ya fermentado por el canal de salida y añadir nueva materia orgánica por el canal de entrada (sin destapar la boca central) que al descomponerse generara nuevo biogás. Estos digestores se adaptan bien para tratar material blando, como estiércol de origen pecuario e inclusive humano, materia celulósica, etc.

CAPÍTULO 3

3.0 OBJETIVOS

3.1. Objetivo general.

Analizar la viabilidad técnica de una planta productora de biogás en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, empleando la materia orgánica biodegradable que se genera en la propia institución.

3.1.1. Objetivo específico.

- 1) Proponer el dimensionamiento de una planta de biogás para la FES-Aragón, a partir de la materia orgánica que se genera en el campus.
- 2) Considerar los diferentes sustratos orgánicos biodegradables que se generan en la FES-Aragón para la obtención de biogás (lodos sedimentados, desechos de comida y poda de césped y arboles).
- 3) Analizar la factibilidad técnico económica de la construcción de una planta de biogás para la FES Aragón.

CAPÍTULO 4

4.0 METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para el diseño y propuesta del digester anaerobio se hizo uso del Software llamado; “Biodigestor Pro” Versión 3.5, desarrollado en Alemania por Aqualimpia Beratende Ingenieure. El software, se desarrolló para dimensionar y diseñar plantas de biogás y biodigestores domésticos e industriales. Este programa, se considera una herramienta precisa para determinar la producción de biogás ($\text{m}^3/\text{día}$), bio-abono y potencial energético (estimación de la energía eléctrica (kwh) y calorífica (kWh-BTU) obtenida de la combustión de biogás) de diferentes sustratos. Los parámetros de diseño que se emplearon fueron: temperatura, carga másica de alimentación y tiempo de retención

Estos parámetros (características fisicoquímicas del agua residual (DQO, DBO), temperatura ambiental, gasto y consumo energético) fueron obtenidas de diferentes dependencias como; el portal de transparencia de la UNAM, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y libros de consulta en materia de agua residual [Metcalf y Eddy, 2004]. El gasto (m^3/d) de agua residual generado en la FES Aragón no fue posible determinarlo de manera precisa, por falta de una base de datos y equipo de medición, así como por no contar con un medidor de flujo a la entrada de la tubería principal de la instalación.

Este dato se obtuvo, realizando estimaciones del caudal con base al número de alumnos, académicos y personal administrativo vigente en cada año empleando distintos métodos estadísticos (aritméticos, geométricos, logarítmicos y de interés compuesto) tomando como base, la dotación de agua por persona estimada para el municipio de Nezahualcóyotl, Edo. de México, regulado por la CNA, a través del Instituto Mexicano de Ingeniería de Costos (IMIC), emitido y vigente desde el 2012. Con la información del agua residual calculada y la estimación de DQO y DBO se consideró una producción de lodos sedimentados de 33 Kg/día.

Por otro lado, se consultó la base de datos de la estación meteorológica ubicada en la colonia San Juan de Aragón (estación más cercana a la zona de estudio donde se encuentra ubicada la FES Aragón), monitoreada por el INEGI para obtener el valor de la temperatura ambiental promedio.

La cantidad de desechos generados en la Facultad, se determinó a través de la consulta de las autoridades de la FES-Aragón a cargo del área de intendencia y administración. Por parte de la administración, se obtuvo un dato promedio de 750 kg/día de desechos orgánicos e inorgánicos; mientras que por parte de la oficina de intendencia, el peso se determinó pesando físicamente la basura generada en la facultad en bolsas de plástico en algunos puntos, estimando un promedio de 470 kg/día de basura orgánica e inorgánica.

El porcentaje de materia orgánica biodegradable presente, se calculó con base a estudios realizados por universidades e instituciones en México como: CINVESTAV del IPN, la Universidad Iberoamericana, Ciudad Universitaria de la UNAM, Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL), estimando un 47% de materia susceptible a degradación anaerobia y el resto correspondiente a material reciclable.

Dando un promedio de generación de residuos sólidos de 319.83 Kg/día de materia orgánica biodegradable, de este total el 30% corresponde a material procedente de la jardinería [Razo 2012, INE 2006, Ruiz 2011, Alcántara 2005, Rosales 2013].

Como material de alimentación a la planta de biogás por concepto de residuos sólidos se tiene: 223.88 Kg/día de desechos de cocina y 95.95 Kg por jardinería.

Por último, se solicitó vía correo electrónico el consumo de energía eléctrica de la facultad al portal de transparencia de la UNAM. La información recabada fue posible para llevar a cabo el diseño y dimensionamiento de la planta de biogás y determinar su viabilidad técnica y económica en la FES Aragón y por último cumplir con el objetivo general del proyecto propuesto.

Las características del sustrato a alimentar y la temperatura, fueron elementos importantes para operar el programa y obtener la producción de biogás, el contenido de CH₄, la cantidad de energía eléctrica producida por un generador eléctrico, la reducción de emisiones

contaminantes y el dimensionamiento de la planta de biogás recomendada y propuesta para la FES Aragón.

Manejo y operación del Software.

Las características de la biomasa alimentada al biodigestor las determina el software empleado, ya que este fue elaborado con una base de datos de diferentes sustratos donde se encuentran los valores de masa seca y masa volátil. Aqualimpia reporta que los valores de masa seca y volátil, se obtuvieron de varias investigaciones y experimentos a través del uso de diferentes métodos reportados en el manual para agua: Standard methods for examination of water and wastewater [APHA, 1995] y recomendado por la empresa quien patento el Software.

Masa Seca.

De acuerdo con el método 2540E de Standard methods for examination of water and wastewater, [APHA, 1995] para determinar la masa seca se utiliza el siguiente procedimiento: Se toma una muestra, se pesa y seca a 105°C en un horno durante un periodo de 48 horas.

Para obtener la cantidad de masa seca se empleó la Ec. (4.1) y (4.2);

$$Humedad(\%) = \frac{P_1 - P_2(100)}{P_1} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

$$MS(\%) = 100\% - Humedad(\%) \quad \text{Ec.(4.2)}$$

Dónde:

P1= peso de la muestra inicial en gramos

P2= peso después del secado.

Masa Volátil.

El componente inorgánico de la biomasa son las cenizas que se obtienen después de la incineración de una muestra a 550 grados centígrados durante 6 horas, la Ec. (4.3) describe el porcentaje de la masa volátil en una muestra de sólidos.

$$MV(\%) = \frac{MS(g) - Ceniza(g)(100)}{MS(g)} \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Para el cálculo del volumen del reactor:

$$V = \frac{Q_{ent}}{TRH} \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Dónde:

V= volumen (m³)

Q= caudal de entrada al digestor (m³/ día)

TRH= tiempo de retención que el sustrato está dentro del digestor (día)

Para el cálculo de la producción de biogás se tomó la siguiente formula.

$$\left\{ M(DM_M) \left(\frac{OM_M}{DM_M} \right) \left(\frac{m^3 \text{ biogas}}{kg OM_M} \right) (1000) \right\} + \left\{ CS(DM_{CS}) \left(\frac{OM_{CS}}{DM_{CS}} \right) \left(\frac{m^3 \text{ biogás}}{kg OM_{CS}} \right) (1000) \right\} \text{ Ec. (4.5)}$$

[Mora 2012]

Dónde:

M: desecho (Ton/año)

DM: contenido materia seca

OM/DM: fracción orgánica de materia seca.

OM: producción de biogás por kg de desecho.

CS: otro sustrato.

CAPÍTULO 5

5.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Diseño y dimensionamiento de la planta de biogás para procesar residuos sólidos biodegradables.

Para implementar el manejo integral de los residuos sólidos biodegradables base seca, se evaluó y estimó la factibilidad de proponer una planta de biogás a partir de los desechos orgánicos que se producen en la FES Aragón, y transformarlos en productos inocuos y valiosos para la institución como biogás y fertilizantes que pueden traer importantes beneficios para la institución, tales como ingresos económicos por comercialización del bioabono o fertilizante producido, generación de energía térmica y eléctrica a partir del biogás transformado y agua tratada, nuevos proyectos de investigación y desarrollo en temas relacionados con la enseñanza-aprendizaje, también de investigación, tanto para estudiantes como académicos de la FES y por consiguiente, disminuir la contaminación ambiental en la zona minimizando las emisiones de gases efecto invernadero a la atmósfera.

La selección, diseño y dimensionamiento de la planta de biogás, se realizó empleando el software “Biodigestor Pro”, manejando como parámetros de diseño la materia orgánica biodegradable que se genera en el propio campus compuesta de poda de jardines, poda de árboles, desechos de cocina (comida, verduras, frutas) y lodos sedimentados en tuberías y registros. Para el diseño, se manejaron dos cargas orgánicas una de 350 Kg por día, que es la carga base sólida biodegradable que se produce en la FES Aragón y una de 5,000 Kg por día producida entre la FES y algunos mercados del municipio. La Tabla 5.1, muestra las cantidades estimadas de cada uno de los sustratos manejados que se producen en la propia institución.

Tabla 5.1. Masa de residuos sólidos biodegradables producidos en la FES Aragón y municipio, para el dimensionamiento de la planta de biogás.

	Opción 1	Opción 2
Residuos solidos	Carga 350 kg día FES-Aragón	Carga 5,000 kg día FES-Aragón + Municipio
Césped	100	100
Desechos de cocina	220	4,870
Lodos sedimentados	30	30

En cada carga de alimentación se estimaron los porcentajes de agua, masa seca (MS) y masa volátil (MV). Por ejemplo, en el caso del césped, se estimó que el 74 % es agua y el 26 % es masa seca, de esta masa seca el 90 % es masa volátil. (Ver gráfica 5.1 a).

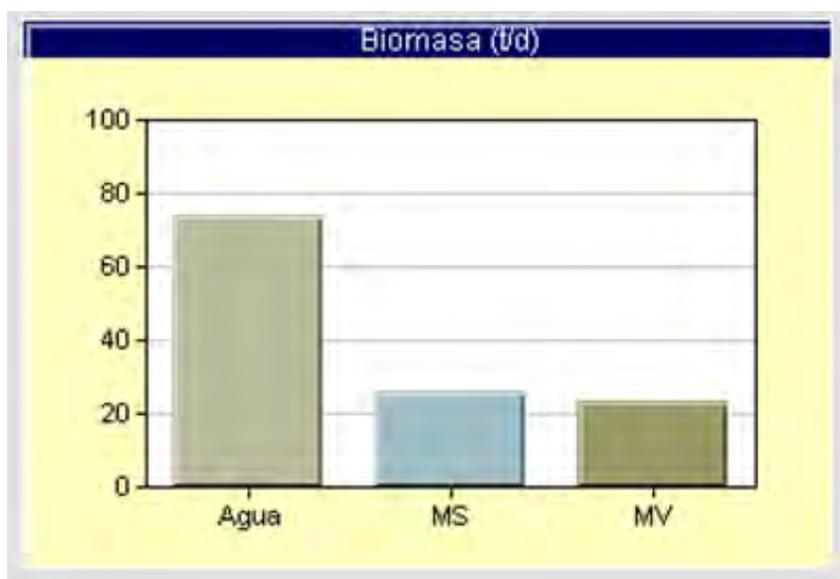


Figura 5.1 a) Composición de césped.

De forma similar, se observa con los desechos de cocina donde el 77 % es agua y el 23 % es masa seca, del cual el 89 % es masa volátil (Ver Gráfica 5.1 b).

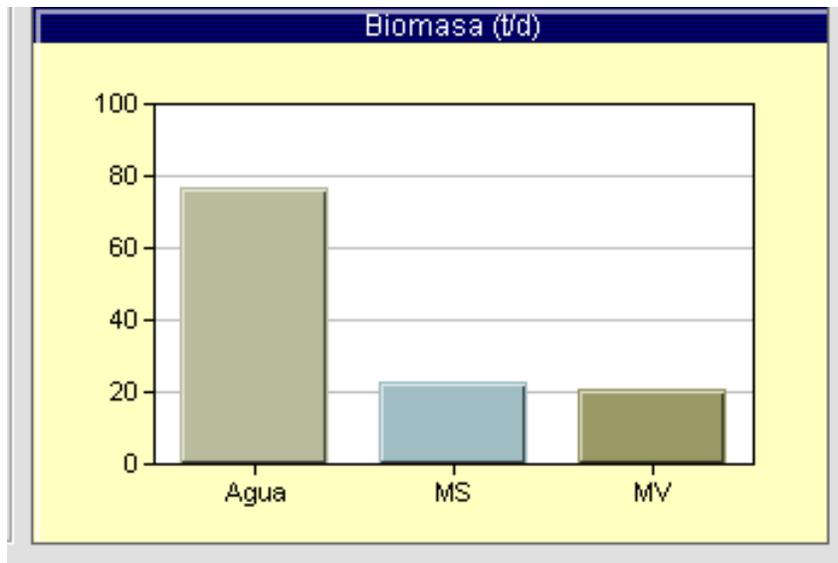


Figura 5.1. b) Composición de desechos de cocina.

Mientras que la Gráfica 5.1 c, muestra los porcentajes de los lodos sedimentados. Los cuales están formados por el 82 % de agua y el 18 % de masa seca. Esta masa seca contiene el 92 % de masa volátil.

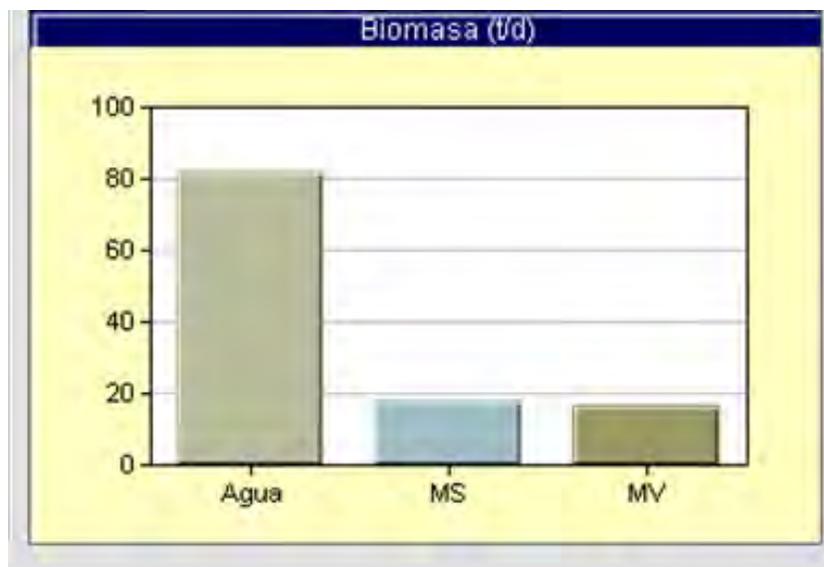


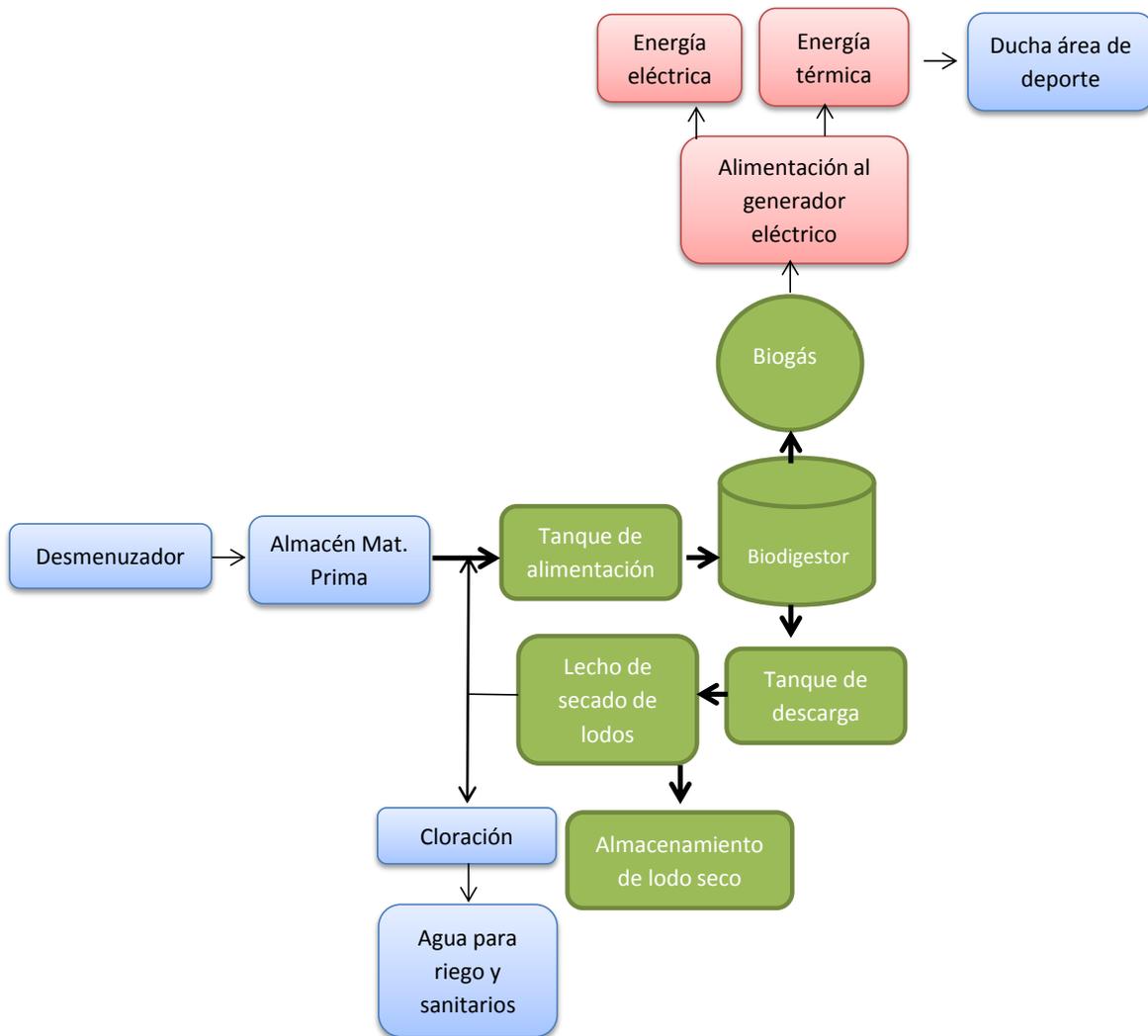
Figura 5.1. c) Composición de lodos sedimentados.

En la Tabla 5.2, se muestran las cantidades en kilogramos de masa seca y masa volátil de los sustratos alimentados al biodigestor.

Tabla 5.2. Clasificación de los desechos según software empleado en la simulación.

Alimentación	Opción 1			Opción 2		
	Carga 350 kg día FES-Aragón			Carga 5,000 kg día FES-Aragón + Municipio		
Biomasa	Masa total	Masa seca	Masa Volátil	Masa total	Masa Seca	Masa Volátil
Césped	100	24.70	22.23	100	24.70	22.23
Cocinas	220	50.60	45.03	4,870	1,120.10	996.89
Lodos sedimentados	30	5.94	5.46	30	5.94	5.46

Los sólidos orgánicos serán alimentados al biodigestor anaerobio para ser transformados a una mezcla de biogás, principalmente metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2) y como sólidos digeridos (nuevas células, composta y fertilizantes). En el esquema 5.1, se observa el diagrama de flujo del proceso de la planta de tratamiento propuesta por el software empleado.



Esquema 5.1. Diagrama de flujo de proceso del tren de tratamiento de la planta de biogás.

El diagrama de flujo de proceso consta de una fase de recolección y preparación de los desechos a tratar mediante un sistema de desmenuzados, una fase de fermentación de los sólidos a través de microorganismos anaerobios en un digestor, un dispositivo para almacenar y captar el biogás y su aprovechamiento para producir energía eléctrica y térmica, un tanque de almacenamiento de la fase líquida (agua tratada) para el aprovechamiento en diversas actividades y un tanque de almacenamiento de lodo seco para su uso y disposición final en campo, como bio-abono o fertilizante.

Los equipos son: un desmenuzador, un tanque de carga y alimentación, un biodigestor, un tanque de descarga, un lecho de secado de lodos con recirculación, un colector de biogás y un generador de energía eléctrica. La planta de tratamiento operará a flujo continuo con mezcla completa y recirculación de agua.

5.2 Descripción del equipo de proceso

5.2.1. Desmenuzador

En esta etapa de pre tratamiento, se preparará la materia prima con un diámetro uniforme (césped, hojas, ramas, residuos de comida) que serán alimentados al biodigestor.

5.2.2. Tanque de alimentación.

El tanque de alimentación tiene como objetivo principal homogenizar la materia orgánica mezclada (residuos sólidos y agua residual) que será alimentada al biodigestor, con el propósito de conseguir una mayor eficiencia en la producción del biogás. La Tabla 5.3 muestra la comparación de las dimensiones de los equipos requeridos en cada una de las cargas de alimentación al biodigestor consideradas y mencionadas en un inicio.

Tabla 5.3. Dimensiones del tanque de alimentación para diferentes cargas orgánicas.

	Opción 1	Opción 2
Dimensiones	Carga 350 kg/día FES-Aragón	Carga 5,000 Kg/día FES-Aragón + Municipio
Forma	Circular	Circular
Diámetro (m)	0.81	3.19
Profundidad (m)	1.20	1.20
Volumen (m ³)	0.62	9.59

de retención hidráulico (TRH) de 35 días, resultando un biodigestor con las siguientes dimensiones: largo, ancho y profundidad de 13.80 m x 9.20 m x 4.5 m, reflejando un volumen total de 27 m³. Para la Opción 2 con una carga orgánica de 5,000 Kg/día, una carga orgánica volumétrica (COV) de 2.73 Kg MV/m³día y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 34 días para trabajar a una temperatura de operación de 35 °C, obteniendo un digestor con las siguientes dimensiones: largo, ancho y profundidad de 16.80 m x 11.20 m x 4.5 m, para dar un volumen total de 375 m³ (Ver Tabla 5.4).

La materia orgánica degradada pasará al tanque de descarga y el biogás producido será captado en un cilindro e introducido a un motor de combustión interna para generar energía eléctrica y térmica, para ser aprovechada una parte en el propio biodigestor y mantener la temperatura de operación óptima, establecida en el rango mesofílico (35°C) y provocar la fermentación del sustrato orgánico con altos porcentajes de producción de biogás.

Tabla 5.4. Dimensiones del biodigestor tipo laguna para diferentes cargas orgánicas de alimentación

	Opción 1	Opción 2
Dimensiones	Carga 350 Kg/día FES-Aragón	Carga 5,000 Kg/día FES-Aragón + Municipio
Tipo	Laguna	Laguna
Profundidad (m)	4.5	4.5
Largo (m)	13.80	16.80
Ancho (m)	9.20	11.20
Volumen (m ³)	27	375

El fenómeno de la fermentación ocurre por la presencia de materia orgánica y un grupo de microorganismos bacterianos anaerobios, que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto porcentaje de gas metano alrededor del 50 al 75 % [Unión Europea, 2010] y lodo granular con alto grado de nutrientes que se pueden utilizar como fertilizante o bio-abono fresco o seco.

Una de las características importantes de la biodigestión es que disminuye el potencial contaminante, reduciendo la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) hasta un 90% dependiendo del diseño y operación.

El fermentador anaerobio debe construirse con materiales inertes a los contaminantes presentes a la carga de alimentación, es decir; resistentes a la corrosión, como lo es el polietileno de alta densidad (HDPE), el cual se debe colocar en las partes internas del biodigestor (paredes y base), mientras que la cubierta superior se recomienda de caucho sintético (EPDM) , para asegurar un correcto funcionamiento del fermentador este material posee características de elongación necesaria, resistencia a los rayos UV, a las rasgaduras e

impermeable al biogás. En la Figura 5.2, se muestra una fotografía de la construcción del biodigestor tipo laguna (excavación, colocado de cimentación de la tubería).



Figura 5.2. Construcción de la estructura del biodigestor tipo laguna.

En la Figura 5.3, se aprecia la distribución total de la membrana de polietileno de alta densidad (HDPE), a lo largo y ancho del biodigestor para impedir la filtración de lixiviados al subsuelo, evitando la contaminación del área aledaña al reactor, así como la contaminación de los mantos acuíferos que se encuentren en la zona. La unión de la membrana, se efectúa mediante la aplicación de calor, esto con el fin de evitar fugas.



Figura 5.3. Laguna cubierta de polietileno de alta densidad (HDPE).

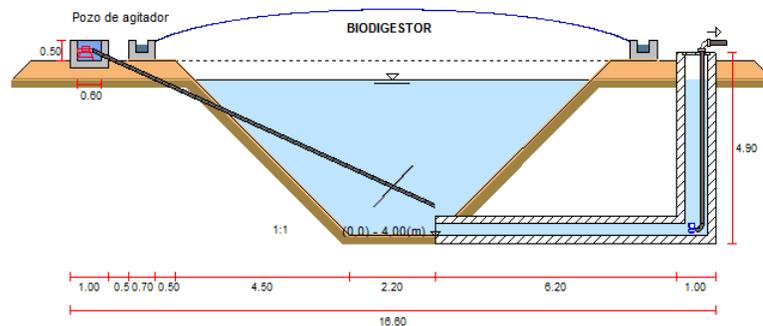
5.2.4. Equipos auxiliares

Los equipos auxiliares como, tuberías y sistema de agitación mecánica e intercambiadores de calor, se muestran en la Figura 5.4. Estos permitirán evaluar y controlar el buen funcionamiento del biodigestor para alcanzar las más altas eficiencias de degradación del sustrato orgánico alimentado, transformándolo a mezcla de biogás principalmente metano (CH_4).



Figura 5.4. Colocación de equipos auxiliares al interior de la laguna.

El sistema de agitación, permitirá mantener una temperatura uniforme, así como una mejor distribución de nutrientes en todo el digestor, evitando la formación de zonas “*muertas*” en el interior e impidiendo la formación de costras en la superficie del tanque por sólidos suspendidos que afectarían la salida de biogás. En el esquema 5.3, se ejemplifica el sistema de agitación en todo el reactor.



Esquema 5.3. Sistema de agitación y bomba de descarga de lodos.

Mientras que en la Figura 5.5, se muestra físicamente el sistema de agitación en operación, el cual se recomienda colocar con una inclinación de 15° con respecto al plano horizontal del biodigestor, esto para asegurar un mezclado perfecto.



Figura 5.5. Sistema de agitación en una planta.

5.2.5. Tanque de descarga

El tanque de descarga tiene geometría rectangular, este permitirá almacenar al efluente tratado junto con el lodo húmedo (líquido biológico o fertilizante) que saldrá del reactor biológico, para ser enviado al lecho de secado. En esta etapa del tratamiento, gran parte de la materia orgánica ha sido degradada a mezcla de biogás y lodo en el biodigestor. Las dimensiones del tanque requerido se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Dimensiones del tanque de descarga

	Opción 1	Opción 2
Dimensiones	Carga 350 Kg/día FES-Aragón	Carga 5,000 Kg/día FES-Aragón + Municipio
Profundidad (m)	1.20	2.36
Largo (m)	1.62	3.54
Ancho (m)	1.12	1.20
Volumen (m ³)	2.18	10

En la Figura 5.6. Se muestra un tanque de descarga



Figura 5.6. Vista lateral del tanque de descarga vacío.

5.2.6. Lecho de secado

El dimensionamiento del lecho de secado, se realiza con base a la cantidad de lodos producidos y extraídos diariamente del digestor, tomando en cuenta, la fracción líquida a la salida, así como la fracción de lodo seco (Ver Tabla 5.6.). Es importante considerar que parte de la fracción líquida será recirculada al tanque de alimentación para mantener

siempre la cantidad de microorganismos necesarios en el proceso y evitar problemas de desestabilización y bajas eficiencias en la producción del biogás.

Tabla 5.6. Dimensiones del lecho de secado de lodos.

	Opción 1	Opción 2
Dimensiones	Carga 350 Kg/día FES-Aragón	Carga 5,000 Kg/día FES-Aragón + Municipio
Profundidad (m)	0.97	3.64
Largo (m)	1.45	5.45
Alto (m)	0.5	0.5
Volumen (m ³)	0.70	10

La tasa de alimentación de lodos al lecho de secado (TAL), se aplica en función al área del lecho en Kg/m², ésta depende de la temperatura ambiental en donde se encuentre colocado el lecho. Para climas con temperaturas promedio menores a 21 °C, se recomienda una alimentación de lodos de 25 Kg/m², para temperaturas mayores de 21 °C y menores a 30 °C, se recomienda alimentar 50 Kg/m² y para temperaturas superiores a 30 °C, se recomienda alimentar 100 Kg de lodos por metro cuadrado.

En éste caso, por encontrar condiciones ambientales con temperaturas menores a los 21 °C, se consideró una alimentación al lecho de secado de 25 Kg de lodos por metro cuadrado de superficie de secado.

En la Figura 5.7, se muestra físicamente el lecho de secado en operación obteniendo un lodo deshidratado que puede ser comercializado como fertilizante para su disposición final.



Figura 5.7. Vista panorámica del lecho de secado de lodo.

La superficie total de terreno que se requiere para la instalación de la planta de biogás en la FES Aragón para una carga de 350 kg/día es de 226.6 m². Mientras que para la carga de 5,000 Kg/día el área es de 395.8 m².

5.3. Ventajas del tratamiento

Finalizado el dimensionamiento de las plantas de biogás propuestas para dos cargas diferentes, se analizaron las ventajas que presentan de manera general. La construcción de una planta de biogás en la FES-Aragón ayudaría a disminuir la cantidad de Gases Efecto Invernadero (GEI) liberados a la atmósfera principalmente metano (CH₄) y bióxido de carbono (CO₂), el metano tiene un poder de calentamiento 21 veces mayor que el CO₂ [Moncayo, 2013]. La Tabla 5.7, muestra un estimado de reducción de emisiones de CO₂ al año en la atmósfera por control de los residuos sólidos generados en la FES-Aragón y parte del municipio.

Tabla 5.7. Reducción de emisiones contaminantes

	Opción 1	Opción 2
	Carga de 350 Kg día	Carga de 5,000 Kg día
Toneladas de CO ₂ año	147	1,302

Sin embargo, para la FES Aragón habría beneficios adicionales como:

1. La posibilidad de crear un centro de investigación y docencia en el área de energía para el desarrollo de nuevos proyectos, promoviendo un espacio de enseñanza-aprendizaje en el tema para capacitar al estudiante y académico, mejorando la docencia e investigación.
2. Favorecer a la población estudiantil aragonesa al disminuir la incidencia de los malos olores y enfermedades gastrointestinales, reduciendo el ausentismo a clases en la institución.
3. Generar nuevos ingresos económicos por la venta de bioabonos producidos con alto poder fertilizante. La materia orgánica no degradada, pasará al lecho de secado para deshidratar el lodo que presenta alto contenido de nutrientes como: nitrógeno, fósforo, carbono, potasio e hidrógeno para ser usado como fertilizante o como mejorador de suelo (Ver Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Producción de fertilizante.

	Opción 1		Opción 2	
Fertilizante	Carga 350 kg día		Carga 5,000 kg día	
	Kg/día	Ton/año	Kg/día	Ton/año
Producción lodo seco	56.31	21	793.06	289
Producción de biol	576	210	8,130	2,967
Producción total	632	231	8,923	3,257

4. Generar ingresos económicos por la comercialización de biogás (metano) para generar energía eléctrica y térmica

La producción de biogás se estima de acuerdo a las características de los sustratos que se alimentan a la planta. Para 350 kg /día de carga orgánica, la producción de biogás es de 38.21 m³ por día, del cual el 57% corresponde a metano; mientras que para la carga de 5,000 Kg/día la producción de biogás fue de 446.80 m³/día, de éste el 53% es metano. Los porcentajes varían debido al tiempo de retención hidráulico. La Tabla 5.9, muestra la producción del biogás y metano producido por la planta productora de biogás por día y año.

Tabla 5.9. Producción de biogás

Gas Combustible	Opción 1		Opción 2	
	Carga 350 kg día		Carga 5,000 kg día	
	Por día	Anual	Por día	Anual
Producción de biogás (m ³)	38.21	13,947	446.80	163,082
Producción de metano (m ³)	21.86	7,979	238.50	87,053

Con esta cantidad de gas metano, se podrá generar energía eléctrica y térmica, promoviendo ahorros derivados del consumo de electricidad y gas, este ahorro puede incrementarse, debido a la constante alza de precios en los combustibles fósiles, reduciendo la inversión en la compra de energéticos.

Para visualizar el ahorro que proporcionaría el biogás, se hizo la conversión a otras unidades energéticas de uso común (Ver Tabla 5.10.).

Tabla 5.10. Equivalencias energéticas en diferentes unidades.

	Opción 1		Opción 2	
	Carga 350 kg día		Carga 5,000 kg día	
	Por día	Por año	Por día	Por año
Biogás (m ³)	38	13,947	447	163,082
BTU	771,986	281,774,854	8,422,628	3,074,259,038
Mega Joule	814	297,288	8,886	3,243,515
M.cal	195	71,006	2,122	774,701
MWhe	0.064	24	0.705	257
HP.h	304	110,935	3,316	1,210,338
BHP	23	8,417	252	91,837
Ton TNT	0	71	2	776

La reducción de emisiones contaminantes en países en vías de desarrollo es más factible, debido a que los procesos de generación de energía en algunas ocasiones suelen ser menos eficientes, en comparación con los países desarrollados. Esto se debe a la tecnología usada, ya que en los países desarrollados se usa tecnología más reciente que en países en vías de desarrollo, por lo tanto; es más factible proponer proyectos de ahorro energético y reducción de contaminantes, debido a que existen más oportunidades de aprovechamiento y uso eficiente de los recursos.

Las ventajas muestran lo atractivo que resultaría el proyecto de una planta productora de biogás desde un punto de vista medioambiental, enseñanza e investigación, sin embargo, es importante analizar la rentabilidad económica que estas tendrían para la Facultad.

5.4 Análisis económico

Las plantas de biogás son generalmente rentables para los inversionistas, debido a:

- Que los costos de instalación por MWatt es sustancialmente inferior al de otras energías renovables.
- La producción de biogás no depende de fenómenos climatológicos o atmosféricos.
- Puede estar funcionando las 24 horas al día, durante los 365 días del año.
- Puede soportar periodos prolongados sin alimentación, sin que se desestabilice el sistema y deje de producir biogás.
- La planta de biogás se amortiza en 10 años. Los fondos propios invertidos se recuperan en 5 años y la vida útil de la planta está establecida en 25 años, aunque pueden prolongarse durante mucho más tiempo. En este caso la planta tiene un tiempo de recuperación de inversión de 3 años.
- La planta de biogás puede operar durante toda la vida útil para maximizar la producción debido a que se clasifica como planta de nueva generación.
- El residuo del proceso de digestión es un abono de primera calidad susceptible de ser vendido en el mercado.

Además, este tipo de plantas de biogás pueden otorgar importantes beneficios al considerar tiempos de retorno de inversión cortos, poca inversión en materia prima y continua operación sin importar los factores climatológicos. Esto es debido a la comercialización de los productos así como al continuo incremento en la producción de energéticos.

Este tipo de proyectos está apoyado por el Protocolo de Kioto desde el 2005 [Moncayo, 2013], y el biodigestor califica como proyecto MDL que significa mecanismos para el desarrollo limpio (MDL) porque captura metano a partir de los desechos sólidos orgánicos biodegradables que en la mayor parte de los países en vías de desarrollo son vertidos al

medio ambiente sin control contaminándolo. Estos desechos al estar presentes en el ambiente se degradan en metano por las condiciones anóxicas que se presentan, requiriendo de ozono para su oxidación. Sin embargo, con el biodigestor se puede evitar este tipo de reacciones atmosféricas y evitar el calentamiento global causado por el metano libre. Es por ello, que este proyecto puede ser financiado por organismos gubernamentales y empresas privadas por considerarse un proyecto de energía renovable, debido a que ofrece la oportunidad de movilizar fondos adicionales para inversiones en energías limpias como el biogás reduciendo el impacto ambiental, creando empleos, ganancias de operación y desarrollo tecnológico para mejorar la calidad de vida de la comunidad aragonesa y poblaciones cercanas a la Facultad.

Se estima que para la instalación de una planta de biogás rentable en la FES Aragón, la inversión inicial es de \$2, 244,047.00 para una carga de alimentación de 5,000 Kg/día, esto incluye, materiales de construcción, costos de equipos y equipos auxiliares. La Tabla 5.11. , desglosa el costo estimado de los equipos y accesorios.

Tabla 5.11. Inversión inicial del biodigestor tipo laguna.

	Opción 1	Opción 2
Descripción	Carga 350 kg día	Carga 5,000 kg día
Tanque de alimentación	\$ 61,815.00	\$ 98,865
Biodigestor	\$ 1,175,330.00	\$ 1,286,506.00
Tanque de descarga	\$ 41,795.00	\$ 47,060.00
Lecho de secado de lodos	\$ 40,378.00	\$ 52,611.00
Filtros de H ₂ S	\$ 234,000.00	\$ 234,000.00
Quemador de biogás	\$ 65,000.00	\$ 65,000.00
Generador	\$ 416,000.00	\$ 416,000.00
Exteriores	\$ 40,690.00	\$ 44,005.00
Total	\$ 2,075,008.00	\$ 2,244,047.00

La recuperación de la inversión inicial y ganancias futuras de la planta de biogás en operación, serían por conceptos de energía eléctrica, producción de fertilizante y bonos de carbono (Ver Tabla 5.12.).

Tabla 5.12. Ingresos anuales.

	Opción 1	Opción 2
	Carga 350 kg día	Carga 5,000 kg día
Energía eléctrica	\$ 30,719.00	\$ 334,646.00
Fertilizante	\$ 84,084.00	\$ 1,016,184.00
Bonos de carbono	\$ 9,555.00	\$ 84,630.00
Total	\$ 124,358.00	\$ 1,435,460.00

Los ingresos de la planta productora de biogás se calcularon de acuerdo a los costos de los productos y subproductos que se obtienen por la operación de la planta. En la parte de ahorro energético se considera un precio por kilowatt de \$ 1.30 pesos, esto corresponde a la tarifa HM en media tensión de la CFE; el precio del fertilizante se estimó de \$ 3,650.00 pesos por tonelada y por último, el costo de bonos de carbono es de \$ 5.0 dólares por

tonelada CO₂ de acuerdo al Instituto Nacional de Ecología [INE sin año] que en pesos serían \$ 65.00 pesos por tonelada.

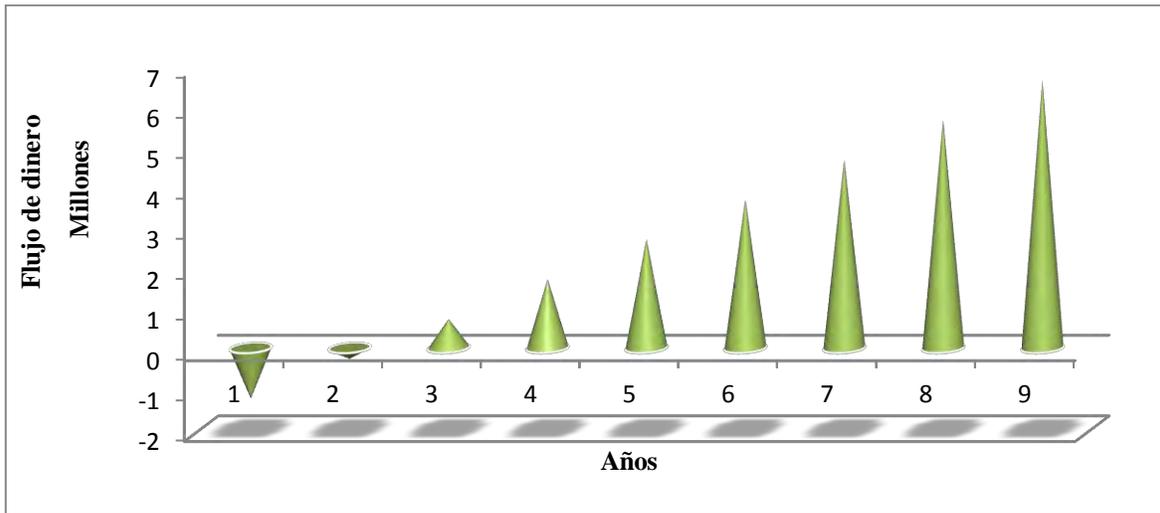
La carga másica actual (350 Kg/día) generada por la FES Aragón, resulta insuficiente para realizar el proyecto debido a que tiene una Tasa Interna de Retorno (TIR) negativa, por lo tanto, un rendimiento anual nulo (Ver Tabla 5.13.). Es decir, los costos de operación anual serían de \$ 406,848.00 pesos y los ingresos que se tendrían son equivalentes a cerca de una tercera parte de los egresos, correspondiendo a \$ 124,358.00 pesos, muy por abajo del costo de operación.

Tabla 5.13. Factores económicos

	Opción 1	Opción 2
Concepto	Carga 350 kg día	Carga 5,000 kg día
Inversión inicial	\$ 2,075,008.00	\$ 2,244,047.00
Costos de operación, mantenimiento y depreciación	\$ 406,848.00	\$ 456,768.00
Ingresos	\$ 124,358.00	\$ 1,435,460.00
Rendimiento anual	\$ -282,490.00	\$ 978,692.00
Tasa interna de retorno		0.44

Para justificar la rentabilidad del proyecto, se dimensionó la planta de biogás con una carga orgánica de alimentación mayor, equivalente a 5,000 Kg/día. Con esta carga de alimentación al biodigestor, se tuvo un rendimiento anual de \$ 978,692.00 pesos, esta ganancia amortiza la inversión inicial de la planta hasta cubrir su costo. El tiempo de retorno de inversión se estimó en 3 años (Ver Gráfica 5.1.)

Gráfica 5.1. Tiempo de retorno de inversión.



La inversión resulta factible, debido a que el tiempo de retorno es a corto plazo, obteniendo ganancias durante casi toda la vida útil de la planta, la cual se estimó para 20 años. Esto con periodos de mantenimiento regular a la planta y accesorios. Además, esto contribuirá a mantener una eficiencia energética sin muchas variaciones a lo largo de la vida útil del equipo.

CONCLUSIONES

1. Se cumplió con el objetivo general, debido a que se obtuvo el estudio de factibilidad técnico económico que implica la implementación de una planta de biogás en la facultad con un costo de inversión inicial de \$ 2, 244,047.00 pesos con un tiempo de retorno de 3 años.
2. Con el empleo de la materia orgánica biodegradable que se produce en la FES-Aragón, se pretende mejorar la calidad de vida de la comunidad aragonés y generar nuevos recursos económicos para la institución.
3. Con este proyecto se pretende mejorar la calidad de vida de la comunidad aragonés y generar nuevos recursos económicos para la institución, empleando la materia orgánica que se genera en la Facultad para producir biogás.
4. La implementación de una planta de biogás con residuos biodegradables generados en la institución no es viable desde el punto de vista económico, ya que los gastos de operación y mantenimiento superan los ingresos generados, sin embargo, desde el punto de vista técnico la planta resulta posible porque la infraestructura no requiere de maquinaria especializada y la Facultad cuentan con el terreno suficiente para su implementación; desde el punto de vista ambiental es una propuesta que ayuda a la reducción de gases contaminantes a la atmósfera.
5. La construcción de una planta de biogás en la FES-Aragón ofrecerían beneficios múltiples: energéticos, económicos y un manejo integral de los desechos.
6. La rentabilidad de la planta de biogás en la FES-Aragón sería posible con una carga de alimentación de materia orgánica biodegradable de 5,000 Kg por día obtenida de la FES y zonas aledañas del municipio.
7. El costo de inversión de una planta de biogás para la FES-Aragón con una carga de 5,000 Kg por día es de \$ 2, 244,047.00, sus ingresos anuales serían de \$ 1, 435,460.00, muy superiores a los costos de operación y mantenimiento, lo que permitiría recuperar la inversión inicial en 3 años.

La construcción de la planta de biogás ofrece los siguientes beneficios:

- La materia orgánica que alimentará al biodigestor presenta altas eficiencias de conversión en biogás.

- El biogás puede ser usado para producir energía eléctrica lo que disminuirá el gasto por electricidad.
- El biogás producido puede ser destinado como energía térmica para calentar agua en el área deportiva.
- Ganancias económicas por la venta de fertilizante.
- Uso del fertilizante en la propia facultad que puede ser usado por el área de desarrollo agropecuario.
- Una reducción de contaminantes que apoya al esfuerzo mundial para evitar el efecto invernadero.
- Una disminución de gases contaminantes producidos en la FES.
- Innovación tecnología en la FES que proporciona nuevos campos de investigación

RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliamente la construcción de una planta de biogás en la FES-Aragón debido a que beneficiaría la enseñanza e investigación en la institución y zonas conurbadas del municipio.

El desarrollo de este proyecto es innovador para la enseñanza e investigación debido a que se lograría transformar la biomasa residual en biogás y con él producir energía, se mejoraría el ambiente y las propiedades físicas del suelo de la institución al producir residuos sólidos con excelentes propiedades fertilizantes, actuando como mejoradores del suelo, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad, la capacidad de infiltración de agua y la capacidad de intercambio catiónico. Además se produciría energía y nutrientes para el desarrollo de núcleos microbianos, que mejoran la solubilidad de los compuestos minerales del suelo y se contribuiría a disminuir el impacto ambiental y ecológico (contaminación, calentamiento global), produciendo fertilizantes de gran calidad.

Con respecto a la FES-Aragón, se recomienda cuantificar la basura generada en la Facultad de manera precisa mediante un muestreo general por un periodo determinado de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Determinar la basura orgánica producida de acuerdo a la NOM- AA-15-1985 método de cuarteo y la NOM- AA-22-1985 peso volumétrico in situ para tener una mayor precisión.
- Someter a los sustratos a un análisis químico para ver sus características y determinar la producción de biogás de manera precisa.
- Implementar y difundir programas para la separación de basura.
- Analizar otros sustratos orgánicos que podrían ser añadidos para la alimentación del biogás.
- Realizar una campaña de concientización dirigida a la comunidad estudiantil con el fin de detallar las ventajas de separar los residuos. Esta campaña se puede llevar a cabo mediante implementación de carteles y platicas informativas.
- Por último, sería interesante que se realizará el diseño detallado de la planta de biogás para la Facultad de Estudios Superiores Aragón.

BIBLIOGRAFIA

- Hernández Eduardo. (2001). El efecto invernadero. *Agrupamiento de Ingenieros Ecologistas*. Argentina.
- Estrada Manuel. (2001). Cambio climático global: causas y consecuencias. *Revistas de Información y análisis*, 16, 7-17.
- (SENER) Secretaría de Energía. (2012). *Balance Nacional de Energía 2011*. México.
- (INE) Instituto Nacional de Ecología. (2012). *Inventario Nacional De Gases de Efecto Invernadero 1990- 2010*. México.
- Ávila Enrique. (2009). *Biogás: opción real de seguridad energética para México*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Moncayo Gabriel. (2013). *Biodigestores manual práctico de diseño: dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. Alemania: Aqualimpia Engineering e.K.
- Carless Jennifer. (1995). *Energía renovable: guía de alternativas ecológicas*. México: EDAMEX
- Domínguez José. (2004). *Energías Alternativas*. España: Equipo SIRIUS.
- (IDAE) Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid, España.
- Unión Europea. (2010). *Informe complementario sobre el estudio de Soluciones viables para el aprovechamiento del Biogás en extremadura, en el marco del proyecto de Cooperación transfronteriza España-Portugal Altercexa, para el apoyo al cambio climático a través del fomento de las energías renovables en Extremadura, alentejo y centro*. España: Altercexa.
- De Juana José. (2003). *Energías renovables para el desarrollo*. España: Thomson

Paraninfo.

Camps Manuel. (2008). *Los biocombustibles*. España: Ed. Mundi Prensa.

Lansing S., Viquez J., Martínez H., Botero R., Martin J. (2008). Quantifying electricity generation and waste transformation in low cost, plug flow anaerobic digestion system. *Revista Ecological Engineering*. (34), 332-348.

Abbasi Tasneem, Tauseef S., Abbasi S. (1994). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation-An overview. *Revista Renewable and sustainable energy Reviews*, 16, 3228-3242.

Toprak Hikmet. (1995). Temperature and organic loading dependency of methane and carbon dioxide emission rates of a full scale anaerobic waste stabilization pond. *Revista Water Research* 29(4), 1111-1119.

(SEMARNAT) Secretaría de Medio Ambiente y (SAGARPA) Recursos Naturales y Secretaría de Agricultura, desarrollo rural, pesca y alimentación. (2010). *Especificaciones Técnicas para el diseño y Construcción de Biodigestores en México*. México: Firco

Varnero Teresa. (2011). *Manual de biogás*. Chile: Ed. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.

Vinoth K. y Kasturi R. (2005). Plastic biodigesters – a systematic study. *Revista Energy for sustainable development* 9(4), 40-49.

Martí Jaime. (2008) *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*. Bolivia: Ed. GTZ PROAGRO.

Hilkiah A., Ayotamuno M., Eze C., Ogaji S., Probert S. (2007). Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Revista applied energy* (85), 430-438.

Arthur R., Baidoo F., Brew-Hammond A. y Cudjoe E. (2011). Biogas generation from sewage in four public universities in Ghana: A solution to potential health risk. *Revista Biomass and Bioenergy*, 35, 3086 - 3093

- Silva Juan. (Sin año). *Tecnología del biogás*. Colombia: Universidad del Valle.
- Garzón Fabricio. (2010). *Estudio de un biodigestor generador de gas metano mediante Abono orgánico para prácticas de energías alternativas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería civil y mecánica de la Universidad técnica de Ambato*. Tesis de Ingeniería, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- Sosa R., Chao R y Del Río J. (1999). Aspectos bioquímicos y tecnología del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás. *Revista computadorizada de producción porcina: Cuba*, 6 (2), 5-19.
- Metcalf and Eddy. (2004). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Estados Unidos: Ed. McGrawhil.
- Razo González. (2012). Composición de residuos sólidos urbanos en dos sitios de disposición final. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28 (1), 13-18.
- Ruiz Mariana. (2012). Caracterización de residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28 (1), 93-97.
- Alcántara V, Cruz I. y Santos E. (2005). *Caracterización y cuantificación de los residuos Sólidos en Ciudad Universitaria*. México: UNAM.
- Rosales M., Saldaña C., Toledo V. y Maldonado L. (2013). Reciclado de los residuos Sólidos urbanos generados en el Instituto Tecnológico de Tepic: Caracterización y potencial. *Revista Nueva Época*, 4 (13), 1-10.
- Mora Héctor. (2012). *Planeación e instalación de un sistema de bioenergía para un hipódromo*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- (INE) Instituto Nacional de Ecología. (Sin año) b. *El sector privado y el cambio climático*. Recuperado de cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- (IPCC) Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Radiative Forcing of Climate Change UNEP. En *Third Assessment Report Climate Change*. Recuperado de http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/248.htm
- Global Methane Initiative. (2013). “Emisiones Mundiales de Metano y Oportunidades de Atenuación”. Estados Unidos. Recuperado de http://www.globalmethane.org/documents/analysis_fs_spa.pdf
- Dell Social Innovation Challenge. (2012). Recuperado de <http://dellchallenge.org/projects/humanure-power-project>
- (INE) Instituto Nacional de Ecología. (2006). *Residuos sólidos urbanos*. Recuperado de [www.2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/495/residuos.html](http://www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/495/residuos.html)