



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**“PLANEACIÓN E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE  
BIOENERGÍA PARA UN HIPÓDROMO”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
EN ENERGÍA-PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

P R E S E N T A:

**HÉCTOR MORA GARCÍA**

TUTORA:

**DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ**

FEBERERO 2012





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Jurado Asignado

PRESIDENTE:	Dr. José Luis Fernández Zayas
VOCAL:	Dr. Arturo Reinking Cejudo
SECRETARIO:	Dra. Alejandra Castro González
1er Suplente:	Ing. Augusto Sánchez Cifuentes
2do Suplente:	M.I. Carlos Villanueva Moreno

### SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Posgrado de la Facultad de Ingeniería.

Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México.

Este trabajo se realizó dentro del proyecto PAPIME 100810: "Prototipos de Sistemas de Bioenergía y Biocombustibles". Por ello, se agradece al programa el apoyo otorgado por la DGAPA-UNAM a la investigación para estos tipos de temas.

### Asesora del Tema:

---

**Dra. Alejandra Castro González**

Facultad de Ingeniería, UNAM

**Sustentante**

---

**Ing. Héctor Mora García**

## AGRADECIMIENTOS

- ❖ A Dios por darme vida y salud para poder realizar este proyecto.
- ❖ A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la mayor casa de estudios y darme nuevamente la oportunidad de ser parte de su historia.
- ❖ Al posgrado de Ingeniería por abrir sus puertas hacia el conocimiento y así poder continuar mi formación profesional y humana.
- ❖ A CONACYT por el apoyo a los estudiantes de posgrado.
- ❖ A mi asesora la Dra. Alejandra Castro González por su valioso apoyo para desarrollar este trabajo el cual tiene una aplicación muy importante dentro de la ingeniería.
- ❖ Al ingeniero Augusto Sánchez Cifuentes por brindarme su confianza para realizar mis estudios de posgrado.
- ❖ A los sinodales por tomarse la molestia de leer este trabajo y marcarme las correcciones pertinentes.
- ❖ A mis profesores de maestría por sus enseñanzas sobre el vasto mundo de la energía.
- ❖ A mis padres, Esther y José por el apoyo que me han dado en todos los sentidos, gracias al cual, he podido llegar hasta donde me lo he propuesto. También les dedico éste trabajo de tesis, que es la muestra de su empeño y dedicación al ser mi soporte durante este recorrido.
- ❖ A mi abuela que pese a sus 94 años de edad sigue siendo para mí un ejemplo de trabajo, esfuerzo, lucidez y longevidad.
- ❖ A mi hermana Sara por el gran apoyo moral que me ha brindado desde hace mucho tiempo y el cual nunca le terminaré de agradecer.
- ❖ A mi hermano Enrique que me hace darme cuenta que el tiempo no pasa en vano y gracias a ello las cosas ya no las cachamos coma antes.
- ❖ A mi compadre Hermes por ser el hermano mayor que nunca tuve.

- ❖ A mis familiares por el apoyo moral y la ayuda para mantenerme con los pies en la tierra.
  
- ❖ A mis colegas del PAE Rodolfo, Toñito, Erik, Armando, Tanya, Emma, Silvi, José, Amparito, Lupita, Oscar, Oscarin, Alex e Ismael que están ahí para dar su valioso apoyo cuando se requiere y gracias a ello he podido tener una perspectiva diferente de las situaciones que se presentan tanto en lo profesional como en lo personal; también al personal de servicio social que sin su valiosa ayuda el PAE no sería lo mismo.
  
- ❖ A mis colegas de la maestría Santa, Pancho, Victor, Liss, María, Jair, Quique y Oscar por compartir un poco de su tiempo para olvidarnos un poco de la rutina.
  
- ❖ A mis amigos por su valiosa amistad la cual me da esa buena vibra para disfrutar cada día de mi vida.

## CONTENIDO

Índice	Página
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	x
Introducción	xi
Objetivo	xii
Capítulo 1 Antecedentes	1
1.1 Panorama energético	1
1.2 Panorama mundial	1
1.3 Tecnologías y fuentes de energía renovables	5
1.4 Potencial mundial y regional de la bioenergía	9
1.4.1 Suministro regional de bioenergía	9
Capítulo 2 Fundamentos	10
2.1 Energía de la biomasa	10
2.2 Biocombustibles	12
2.2.1 Tecnologías de valorización de fraccionamiento de la madera y de madera de biomasa	16
2.2.2 Bio-refinerías	18
2.2.3 Principales deficiencias y obstáculos técnicos y no técnicos de las bio-refinerías	19
2.3 Procesos de conversión termoquímica de bio-renovables	20
2.3.1 Síntesis Fischer-Tropsh (SFT) de gas a partir de bio-renovables	25
2.4 Procesos bioquímicos de conversión	28
Capítulo 3 Metodología	30
3.1 Caracterización de desechos en el hipódromo	30
3.2 Prueba anaerobia experimental	31
3.3 Estiércol para la prueba experimental	33
3.4 Parámetros hidráulicos y físico-químicos monitoreados en la etapa experimental del reactor anaerobio	33
3.5 Arranque del digestor	37
3.6 Desarrollo de la metodología para la evaluación económica	38
Capítulo 4 Estudio del caso	41
4.1 El hipódromo	41
4.2 Generación de residuos en el caso de estudio	42

4.2.1 Gradas	42
4.2.2 Granja del hipódromo	43
4.2.3 Restaurantes y cafeterías	45
4.2.4 Caballerizas	46
4.2.5 Estadísticas de los residuos generales	47
4.3 Consumo energético	48
Capítulo 5 Resultados	53
5.1 pH	53
5.2 Temperatura	53
5.3 Producción de biogás	54
5.4 Producción acumulada	55
5.5 Escalamiento del reactor anaerobio	57
5.5.1 Volumen del digestor	57
5.5.2 Almacenamiento del lodo digerido	58
5.5.3 Producción de biogás	58
5.5.4 Almacenamiento de biogás	59
5.5.5 Dimensiones del digestor	59
5.5.6 Calculo del motogenerador	60
5.5.7 Ahorro estimado	61
5.5.8 Indicadores económicos	64
5.5.9 Emisiones evitadas	67
6. Conclusiones	68
Referencias	70

## Índice de Tablas

	Página	
Tabla 1.1	Madurez de las tecnologías de energías renovables	6
Tabla 2.1	Clasificación de los biocombustibles renovables basadas en tecnologías de su producción	13
Tabla 2.2	Principales tecnologías de valorización de la madera	18
Tabla 2.3	Productos de la biomasa vegetal por pirólisis y gasificación	24
Tabla 2.4	Composición del gas de síntesis de la gasificación de la biomasa	27
Tabla 3.1	Parámetros monitoreados y equipo empleado durante la prueba anaerobia	34
Tabla 3.2	Resultados de la caracterización de los desechos	36
Tabla 3.3	Porcentaje de sustancias al arranque del digestor	37
Tabla 3.4	Porcentaje de sustancias al arranque del digestor	37
Tabla 4.1	Residuos generados en las gradas del hipódromo	42
Tabla 4.2	Residuos generados en granja del hipódromo	44
Tabla 5.1.	Ahorro estimado usando biogás para generación eléctrica	62
Tabla 5.2	Ahorro estimado con gas	63
Tabla 5.3	Ahorro estimado usando biogás para generación eléctrica	63
Tabla 5.4	Inversión total	64
Tabla 5.5	Indicadores económicos del proyecto	64
Tabla 5.6	Egresos totales	64
Tabla 5.7	Ingresos totales	65
Tabla 5.8	Flujos estimados del proyecto	66
Tabla 5.9	Comparación de resultados experimentales	67

## Índice de figuras

	Página	
Figura 1.1	Expansión de demanda energética 1980-2030	2
Figura 1.2	Evolución de 1971 al 2006 del consumo mundial final de energía por fuente energética Mtep	3
Figura 1.3	Porcentajes de fuentes energéticas de consumo final 1973 y 2006	4
Figura 1.4	Porcentajes de fuentes de energía eléctrica 1973 a 2006	4
Figura 2.1	Caracterización de los estudios impulsados por la demanda y centrado en recursos naturales	11
Figura 2.2	Principales componentes de la plantas de biomasa	17
Figura 2.3	El fraccionamiento de la madera y algunos productos químicos de la madera	17
Figura 2.4	Procesos de conversión de biomasa térmica	21
Figura 2.5	Descripción de los procesos de conversión de materias vegetales para biocombustibles	21
Figura 2.6	Descripción de los procesos de conversión de materias vegetales para	24
Figura 2.7	Productos del proceso de gasificación	25
Figura 2.8	Producción de combustible diésel de biogás de síntesis por síntesis Fischer-Tropsch	27
Figura 2.9	Proceso de hidrólisis enzimática	29
Figura 3.1	Composición de los residuos de los estercoleros en el hipódromo	30
Figura 3.2	Fotografía del estiércol de caballo del hipódromo	31
Figura 3.3	Composición química de los estercoleros	31
Figura 3.4	Esquema del reactor anaerobio a nivel laboratorio	32
Figura 3.5	Fotografía del reactor anaerobio a escala laboratorio (vista lateral)	33
Figura 3.6	Fotografía del reactor anaerobio a escala laboratorio (vista frontal)	33
Figura 3.7	Medición del volumen del biogás por desplazamiento de agua	35
Figura 3.8	Fotografía del digestor con la carga inicial del arranque	38
Figura 4.1	Vista del hipódromo, gradas y parte de la pista	42
Figura 4.2	Composición de RSU de las gradas del hipódromo	43
Figura 4.3	Composición química de los RSU de la gradas del hipódromo	43
Figura 4.4	Composición física de los desechos de la granja del hipódromo	44
Figura 4.5	Composición química de los residuos de la granja del hipódromo	45
Figura 4.6	Composición física de RSU de los restaurantes del hipódromo	45
Figura 4.7	Tipos de residuos de las caballerizas en el hipódromo	46
Figura 4.8	Composición química de los residuos de caballerizas	46

Figura 4.9	Peso volumétrico de los residuos generales del hipódromo	47
Figura 4.10	Relación carbón/nitrógeno de los residuos del hipódromo	48
Figura 4.11	Poder calorífico de los residuos generales del hipódromo	48
Figura 4.12	Consumo en kWh en 2006 y 2007 en el hipódromo	49
Figura 4.13	Demanda en kW en 2006 y 2007 en el hipódromo	50
Figura 4.14	Consumo de gas durante el 2006 y 2007	50
Figura 4.15	Costo del gas durante el 2006 y 2007	51
Figura 4.16	Extracción del estiércol	51
Figura 4.17	Extracción del estiércol de las caballerizas	52
Figura 4.18	Plano del hipódromo, en el se indican los lugares donde se generan los residuos.	52
Figura 5.1	Valor del pH durante los días de operación	53
Figura 5.2	Comportamiento de la temperatura durante la operación del reactor	54
Figura 5.3	Producción de biogás en el reactor anaerobio en los primeros 45 días de operación de arranque	55
Figura 5.4	Producción de biogás durante todo el proceso de arranque y operación semicontinua del reactor anaerobio	56
Figura 5.5	Interrelación entre los parámetros de pH y temperatura con la producción de biogás de operación del reactor anaerobio	56
Figura 5.6	Producción de biogás acumulada durante la fase batch y discontinua de operación del reactor anaerobio	57

## RESUMEN

En este estudio se analiza la factibilidad técnica-económica de la instalación de un digestor de volumen nominal de  $1,000\text{m}^3$  para la degradación de estiércol de caballo. El estiércol se genera diariamente en un Hipódromo de la ciudad de México, en una cantidad de  $41.6\text{m}^3/\text{día}$ . El digestor operaría bajo condiciones mesofílicas, es decir, a una temperatura de  $35^\circ\text{C}$  y un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 11 días. El tanque de almacenamiento de lodos digeridos sería de un volumen nominal de  $350\text{m}^3$  con un tiempo de almacenamiento de un mes. Bajo estas condiciones se pretende generar  $1,129.93\text{m}^3\text{Biogás}/\text{día}$  equivalente a  $678\text{m}^3\text{CH}_4/\text{día}$ , con una capacidad de generación eléctrica de  $300\text{kW}$  durante 4 horas diariamente. Para esto se haría uso de un motogenerador marca CUMMINS con una capacidad  $300\text{kW}$ . Puesto que la generación de metano diaria es de  $678\text{m}^3/\text{día}$  ó  $247,454.76\text{ m}^3/\text{año}$  la cantidad de toneladas métricas de  $\text{CO}_2$  que se dejarían de emitir a la atmósfera es de  $11,880.5\text{ Ton}_{\text{eq}}\text{CO}_2/\text{año}$ .

Gracias a la aplicación de este sistema se pueden obtener ingresos de  $\$3,602,612.00$  en el primer año de operación. Los ingresos que se obtendrían en el primer año por facturación eléctrica serían de  $\$464,280.00$  mientras que por el ahorro de gas natural serían de  $\$613,332$  y los ahorros por evitar la colecta de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) sería de  $\$2,555,000.00$ ; En el estudio, el horizonte de planeación es a 10 años, generándose los flujos de efectivo suficientes para financiar el proyecto a un costo capital del 12%, recuperándose la inversión dentro del horizonte de planeación del proyecto planeado.

## INTRODUCCIÓN

La explotación de los recursos energéticos renovables y las tecnologías son un componente clave del desarrollo sostenible (Anon, 1995b). Hay tres razones importantes y se listan a continuación:

- 1) Los recursos energéticos renovables tienen mucho menos impacto ambiental en comparación con otras fuentes de energía ya que no hay fuentes de energía con cero impacto ambiental. Hay una variedad de opciones disponibles en la práctica hacia un cambio en las energías renovables que podría proporcionar un sistema de energía mucho más limpia que reforzaría los controles en materia de energía convencionales.
- 2) Las fuentes de energías renovables no pueden ser agotadas a diferencia de los combustibles fósiles y los recursos de uranio. Si se usan en apropiadas y eficientes estas aplicaciones, pueden proporcionar un suministro de energía confiable y sostenible casi indefinidamente. Por el contrario, los combustibles fósiles y los recursos de uranio son finitos y pueden verse mermados por la extracción y el consumo.
- 3) Están a favor de la descentralización del sistema de potencia y soluciones aplicables a nivel local más o menos independiente de la red nacional. Mejorando así la flexibilidad del sistema y energía económica a pequeñas poblaciones aisladas. Es por eso, que muchas tecnologías de energía renovable están potencialmente disponibles para su uso en zonas urbanas.

La bioenergía se ha identificado como la más importante fuente de energía renovable. Ésta se enfoca a la reducción de emisiones de dióxido de azufre y carbono, a la electricidad y la generación de fuentes de calor, uso de biogás y obtención de energía a través de desechos. Existen diversos procesos para convertir la biomasa en energía, y en algunos de estos se utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de los microorganismos para producir combustibles, siendo el más importante la degradación anaerobia, que en países de alta población son muy utilizados. La degradación anaerobia es un proceso en que la biomasa a través de las bacterias generan un gas combustible llamado biogás, que es una mezcla de metano, bióxido de carbono, hidrógeno, ácido sulfhídrico, amoníaco, oxígeno y vapor de agua dependiendo de los diferentes desechos degradados en un digestor. Además la materia sólida remanente del proceso es un buen fertilizante orgánico.

El método de degradación anaerobia es realizado en un digestor. El digestor es una instalación herméticamente sellada donde se introduce la materia orgánica a degradar y el biogás producido es recolectado. Aquí los desechos son sanitizados, es decir se eliminan los organismos patógenos; cualquier desecho orgánico produce biogás y biomasa estabilizada dentro del digestor. La producción de biogás de todos los digestores en China es de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  y es usado por 25 millones de personas para cocinar o

para iluminar de 8 a 10 meses en un año. Existen 400 estaciones y 800 productoras de biogás con una capacidad total de 5,800 HP y 7,800 KW respectivamente que abastecen electricidad a 17,000 casas. El metano generado en el biogás es el mismo que el gas natural utilizado actualmente en México. En el mercado de los energéticos, el biogás compite con: 1) La leña, 2) El gas natural, 3) La electricidad, 4) Fuentes energéticas utilizadas usualmente en la cocción; con el kerosene, las velas y la electricidad en la iluminación (sobre todo en lugares donde el servicio es deficiente o no existe); 5) Con el gas natural y la electricidad en la refrigeración y finalmente la gasolina o el diesel, como combustible para motores. Lo anterior permite confirmar que esta tecnología, genera productos importantes que pueden sustituir a productos que tienen amplia demanda actualmente.

Dentro de los sustratos utilizados existen algunos muy estudiados como las aguas residuales urbanas, residuos agrícolas, estiércol de cerdo, estiércol de vaca y residuos orgánicos industriales. Sin embargo, hay sustratos o mezclas de éstos que despiertan gran interés por conocer la productividad que pueden alcanzar al tratarlos con sistemas anaerobios, tal es el caso de los desechos de caballos y virutas de madera. Este caso es del hipódromo del caso de estudio de este trabajo. Actualmente no existen estudios sobre esta mezcla de desecho y es necesario conocer la factibilidad de las propuestas de sistemas anaerobios para la degradación de la mezcla de excrementos de caballo con virutas y aserrín de madera. Es por ello, el objetivo de este trabajo que se presenta a continuación.

## **OBJETIVO**

Determinar la factibilidad técnica y ambiental de la degradación anaerobia de desechos de un hipódromo para la producción de energía.

## **CAPÍTULO 1**

### **ANTECEDENTES**

#### **1.1 PANORAMA ENERGÉTICO**

La energía es la moneda convertible de la tecnología. Sin energía toda la estructura de la sociedad como se conoce, se derrumbaría. El efecto de un corte de 24 horas en el suministro eléctrico en una ciudad muestra como la misma depende totalmente de esa forma de energía tan importante. Las computadoras y elevadores dejan de funcionar, los hospitales dejan dar servicio; en pocas palabras, todos los servicios que dependen de la energía eléctrica colapsarían. La población actualmente crece a un ritmo mucho más rápido que la media del 2% y la necesidad de energía es más intensa. El estilo de vida y aumento de la demanda de energía van de la mano y las ricas economías industrializadas, que contienen 25% de la población mundial consumen el 75% del suministro mundial de energía (Fells, 1990).

Los problemas con el suministro de energía y uso de la misma están relacionados no sólo con el calentamiento global, sino también con cuestiones medioambientales como la contaminación atmosférica, lluvia ácida, el agotamiento del ozono, destrucción de los bosques y la emisión de sustancias radiactivas. Estas cuestiones debe tenerse en cuenta al mismo tiempo que la humanidad pueda alcanzar un futuro brillante en cuanto a la energía se refiere con un mínimo impacto ambiental. Existe mucha evidencia, que sugiere que el futuro se verá negativamente afectado si los seres humanos mantienen la degradación del ambiente.

#### **1.2 PANORAMA MUNDIAL**

Las estadísticas de la Prospectiva Mundial de la Energía 2008 (World Energy Outlook 2008) de la Agencia Internacional de Energía, (IEA por sus siglas en inglés) prevé un crecimiento de la demanda de energía primaria del 45% entre los años 2008 y 2030 (Figura 2.1), con tasa de crecimiento anual promedio del 1.6%, con los combustibles fósiles como representantes del 80% de la energía.

Se prevé que se mantendrá el petróleo como energético mayoritario seguido por el carbón, con un crecimiento muy pequeño en el ámbito del gas natural. Igualmente se prevé que para el 2010, las tecnologías renovables modernas hayan sobrepasado al gas natural convirtiéndose en la fuente de energías primarias para la generación de energía eléctrica más importante, solo superada por el carbón (IEA, 2008a).

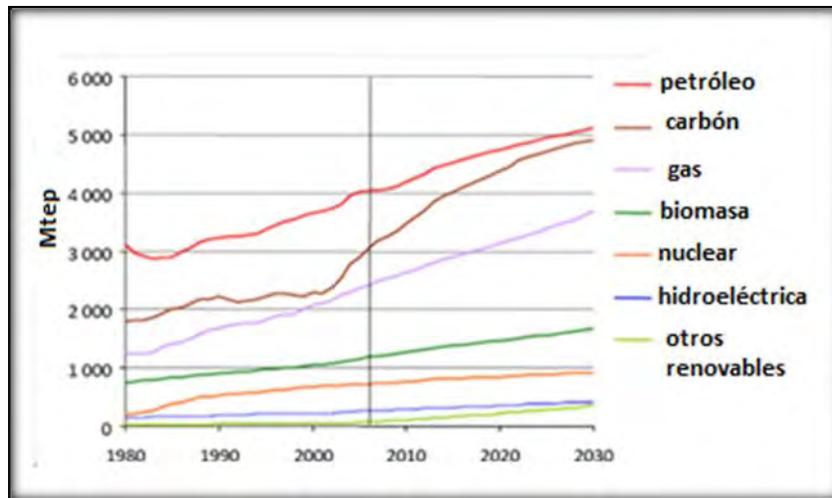


Figura 1.1 Expansión de demanda energética 1980-2030 (IEA, 2008a)

Las cifras aunque crudas, demuestran un desborde en el consumo energético, tal es el caso de las reservas probadas de petróleo y del gas natural, las cuales están calculadas en 1.2 billones de barriles. El tiempo que le tomó a la humanidad consumir el primer billón de barriles de petróleo fue de 140 años. El tiempo que le tomará consumir el siguiente billón será 30 años.

Cabe resaltar que aunque la demanda petrolera seguirá incrementándose y siendo el cimiento del consumo energético, su ritmo de crecimiento es menor que el de las últimas dos décadas. Ésto debido al continuo aumento en el precio del petróleo, las mejoras en eficiencia del consumo de combustible en vehículos y las políticas que impulsan el uso de Energías Renovables (ER). Otras consideraciones ambientales han incrementado más la atención por parte de las industrias de energía y el público. En algunas jurisdicciones, los precios de los recursos energéticos han aumentado en las últimas dos décadas, en parte para considerar los costos ambientales. Se espera que la población mundial se duplique a mediados del siglo 21 y el desarrollo económico casi seguro que seguirá creciendo (Anon, 1995a). La demanda global de servicios de energía se espera que aumente su magnitud para el año 2050, mientras que de energía primaria demandada se espera que aumenten de  $1,5 \pm 3$  veces (Anon, 1995a). Al mismo tiempo aumenta la preocupación en relación con los problemas ambientales relacionados con la energía, como la lluvia ácida, el agotamiento del ozono estratosférico y el cambio climático global. Una solución a la inminente escasez de energía es el uso de tecnologías y fuentes de energía renovables. Ésto a veces da lugar a afirmaciones extravagantes e imposibles de ser realizadas. Métodos de producción prácticos, fiabilidad, la aplicabilidad, la economía, la escasez de la oferta y la aceptación por el público, todos deben ser considerados en consecuencia.

En última instancia, todos los suministros de energía en la Tierra se derivan del sol y la energía solar proporciona un flujo continuo de energía que nos calienta, motivo por el cual los cultivos pueden

crecer a través de la fotosíntesis. La tierra y el mar se calientan diferencialmente y ésto causa ondas de vientos y por supuesto la lluvia que conduce a la energía hidroeléctrica. La marea es el resultado de la atracción gravitacional de la luna y el sol, y el calor geotérmico; el resultado de la radiación que proviene del interior del planeta. Todas son posibles fuentes de energía, pero que la ciencia entienda no significa que hay recursos para la investigación y que un proyecto de ingeniería sea la solución adecuada (Fells, 1990). Los científicos entienden que el proceso es la parte fácil, la ingeniería es la parte que cuesta llevar a cabo.

Sobre la energía final de consumo se aprecia que aún al crecimiento del uso de la energía eléctrica por las ventajas que ésta ofrece, sigue permaneciendo en el segundo lugar de demanda energética; siendo superada ampliamente por el petróleo y seguida muy de cerca por el gas (Figura 1.2).

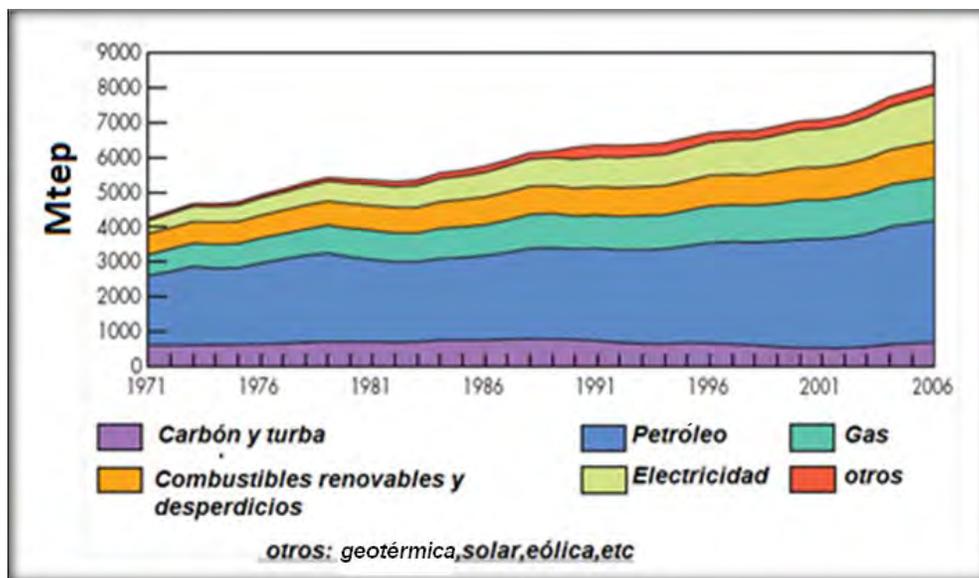


Figura 1.2 Evolución de 1971 al 2006 del consumo mundial final de energía por fuente energética Mtep, (IEA, 2008b).

Aún con los avances tecnológicos, el mundo se mantiene con base en la energía térmica (Figura 1.3). Esto se puede reafirmar observando que las principales fuentes de energía como lo son petróleo y el gas, la mayoría de la ocasiones terminan siendo empleadas como combustibles. Además de que la principal fuente de energía eléctrica proviene de la energía térmica (Figura 1.4).

Con base a las explicaciones anteriores, se puede destacar el hecho de que la energía es uno de los principales factores que deben de ser considerados en los debates del desarrollo sustentable. Varias definiciones del desarrollo sustentable se han planteado, por ejemplo: "El desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Anon, 1987). Hay muchos factores que pueden contribuir a lograr el desarrollo

sustentable. Uno de los más importantes es la exigencia de un suministro de recursos energéticos que sea plenamente sustentable (Norton, 1991; MacRae, 1992; Rosen, 1996; Dincer y Rosen, 1998).

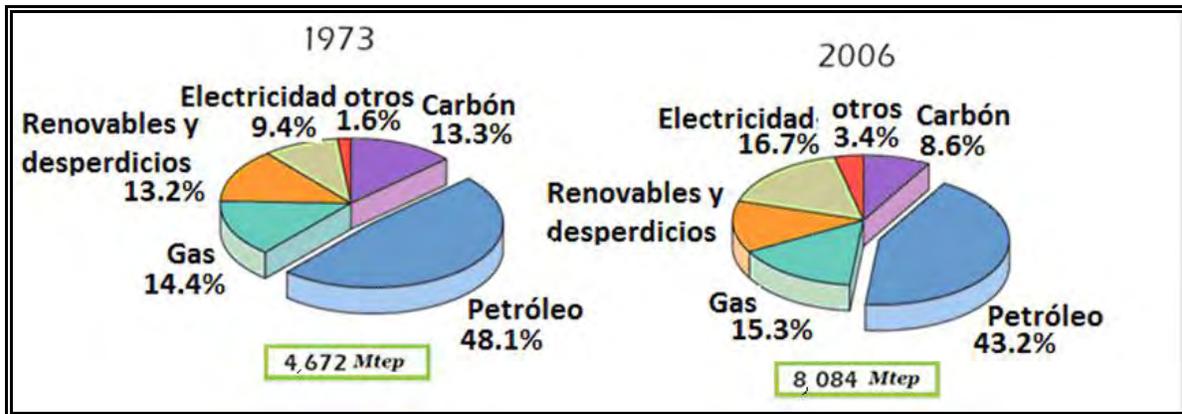


Figura 1.3 Porcentajes de fuentes energéticas de consumo final 1973 y 2006 (IEA, 2008b)

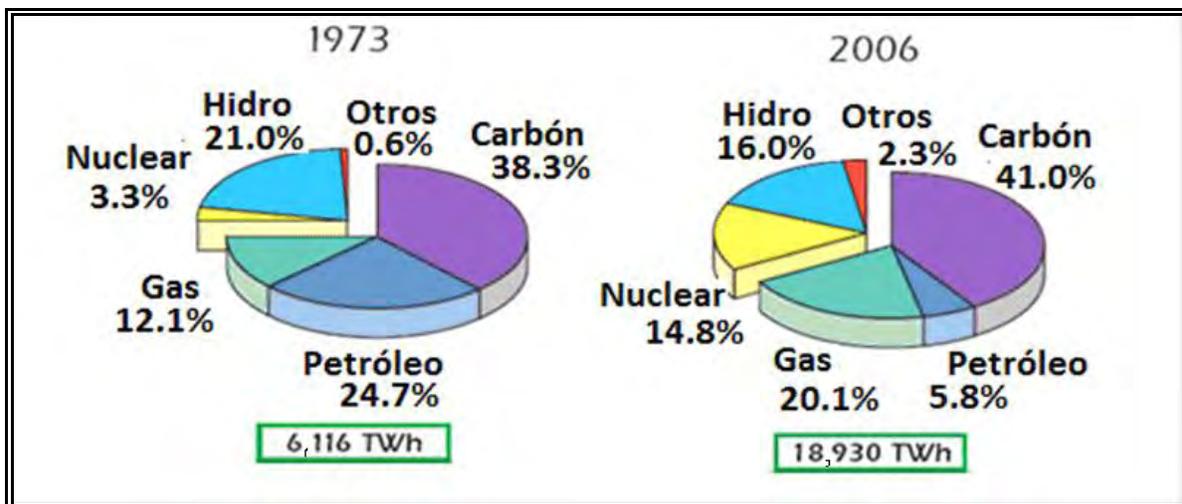


Figura 1.4 Porcentajes de fuentes de energía eléctrica 1973 a 2006 (IEA, 2008b)

Un suministro seguro de los recursos energéticos podría ser de ser necesario pero no suficiente para el desarrollo dentro de una sociedad. Además, el desarrollo sustentable dentro una sociedad demanda un suministro sustentable de los recursos energéticos. En el largo plazo, es fácil y sustentable a un costo razonable y puede ser utilizado para todas las tareas necesarias sin causar impactos negativos en la sociedad y una efectiva y eficiente utilización de los recursos energéticos. Con respecto a lo dicho, la conexión íntima entre fuentes renovables de energía y desarrollo sostenible es evidente.

### 1.3 TECNOLOGÍAS Y FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES

Desde la crisis del petróleo de principios de los años 70's, los recursos energéticos renovables y las tecnologías han sido investigaciones activas a nivel mundial así como el desarrollo en el ámbito de los recursos energéticos renovables y sistemas. Durante este tiempo, los sistemas de conversión de energía que fueron basados en tecnologías de energías renovables parecían ser más atractivas debido a hechos como el proyectado alto costo del petróleo y las previsiones de rentabilidad y fácil implementación de sistemas de energía renovable. Además, en tiempos más recientes, se ha hecho que las fuentes de energía renovables y sistemas puedan tener un impacto beneficioso en técnicas esenciales, ambientales, económicas, y la problemática política del mundo (McGowan, 1990):

- Los principales problemas ambientales: Por ejemplo, la lluvia ácida, el agotamiento del ozono estratosférico y efecto invernadero
- Degradación del ambiente
- El agotamiento de las fuentes no renovables de energía del mundo
- El uso creciente de energía en los países en desarrollo.

Como se ha señalado por Hartley (1990), las tecnologías de energía renovables producen energía negociable mediante la conversión de los fenómenos naturales en formas de energía útil. Estas tecnologías usan la energía inherente a la luz del sol y sus efectos directos e indirectos en la tierra (fotones, el viento, caídas de agua, calentamiento y el crecimiento de plantas), las fuerzas gravitacionales (las mareas), y el calor del núcleo de la tierra (geotermia) como los recursos que producen energía. Estos recursos representan un potencial de energía masiva que equivale a recursos fósiles. Por lo tanto, la magnitud de éstos, no es un obstáculo considerable en la producción de energía. Sin embargo, son generalmente difusos y no totalmente accesibles, algunos son intermitentes y todos tienen distintas variabilidades regionales. Estos aspectos de su naturaleza dan lugar a nuevas dificultades, pero solucionables técnicas, institucionales, económicas y desafíos inherentes en el desarrollo y uso de recursos energéticos renovables. A pesar de tener tales dificultades y desafíos, la investigación y desarrollo sobre los recursos de energías renovables y las tecnologías se ha ampliado durante las últimas dos décadas por los hechos mencionados. Hoy en día, un progreso significativo está compuesto por:

- La mejora en la captura y conversión eficientes
- La reducción de los costos iniciales y de mantenimiento
- El aumento de la fiabilidad y aplicabilidad
- Comprensión de los fenómenos de los sistemas de energía renovable

La Tabla 1.1 muestra las tecnologías de energías renovables como una mezcla de viejos conceptos (por ejemplo, la energía hidroeléctrica, geotérmica, biomasa) y las nuevas tecnologías (por ejemplo, la energía solar, la oceánica y la térmica).

Tabla 1.1 Madurez de las tecnologías de energías renovables (Hartley, 1990)		
Capacidad demostrada de energía hidroeléctrica	Fase de transición	Futuro potencial de turbinas de alta tecnología
Geotérmica	Geotérmica	Geotérmica
Hidrotérmica	Hidrotérmica	Roca seca caliente Geopresión Magma
Biomasa	Biomasa	Biocombustibles
Combustión directa	Etanol de maíz	Metano
Gasificación	Desechos municipales	
Solar pasiva	Solar activa	Solar térmica
Edificios	Edificios	Electricidad moderna
	Procesos calientes	Procesos de alta temperatura
	Solar térmica	
	Térmica/ gas híbrido	
Energía fotovoltaica	Energía fotovoltaica	Energía fotovoltaica
Pequeña distancia	Energía remota	Potencia útil
Productos especializados	Diesel híbridos	
		Océano Térmica

Las tecnologías de energías renovables se vuelven importantes como el aumento de las cuestiones medioambientales, la utilidad (hidroeléctrica), aumento de costes y aumento los costos laborales aumentan (Dincer, 1998a). La incierta economía mundial es un factor adicional. La situación puede revertirse con un aumento de la investigación y desarrollo en los campos de la tecnología de punta, algunas de las cuales son estrechamente asociados a las tecnologías de energías renovables. Ésto puede llevar a innovadores productos y la creación de empleo que son apoyados por los gobiernos. El progreso en otras tecnologías, sobre todo en la tecnología de punta ha inducido a algunas ideas innovadoras en diseños de sistemas de energía renovable. La toda poderosa computadora ha tomado las medidas para

optimizar el rendimiento del sistema, el costo/beneficio y los impactos ambientales, incluso antes de que el ingeniero abandonara la mesa de dibujo.

El funcionamiento y los atributos financieros de las tecnologías de energías renovables, que incluyen la modularidad y flexibilidad, bajos costos de operación (lo que sugiere costo relativo seguridad), son considerablemente diferentes a los de las tecnologías tradicionales, basados en fósiles; cuyos atributos incluyen grandes inversiones de capital, largos plazos de ejecución, e incertidumbre en los costos de operación, con respecto a los costos del combustible en el futuro. Los beneficios globales de las tecnologías de energías renovables a veces no son claros y por lo tanto, a menudo deben evaluarse por no ser tan rentables como las tecnologías tradicionales. Las tecnologías de energías renovables, en general, a veces son vistas como sustitutas directas de las tecnologías existentes. Sus beneficios y los costos son concebidos en términos de métodos de evaluación y desarrollados para las tecnologías existentes. Por ejemplo, las tecnologías renovables como la solar y otras pueden aportar pequeños incrementos de capacidad a los sistemas energéticos existentes a plazos cortos de entrega. Estas unidades de generación de energía, por lo general brindan mayor flexibilidad en el incremento de la oferta más que las grandes unidades y unidades de largo plazo, tales como las centrales nucleares.

Para los años 90's, algunas de las tecnologías de energía renovable con eficiencia ya probada durante años en el campo, seguirán creciendo con diseños mejorados. La demanda del mercado para las energías renovables por países en desarrollo crecerá a medida que se busque un mejor nivel de vida. El impacto del uso de sistemas de energía renovable en el mundo sin duda reducirá los niveles de contaminación. Durante las últimas dos décadas, un enorme progreso se ha hecho en las tecnologías de energía solar, especialmente en la fotovoltaica (FV). La energía solar fotovoltaica, es decir la conversión directa de luz solar en energía eléctrica mediante un dispositivo de estado sólido, ha progresado rápidamente desde el lanzamiento del primer satélite en los 50's. El impulso se debió a la tecnología de chips de silicio en todas partes en Estados Unidos, Japón y Alemania, que ha dado lugar a la industria electrónica del mundo que conducen a las autopistas de las comunicaciones. Ahora, las grandes estaciones terrestres de energía fotovoltaica, algunas alrededor de 100 MW de capacidad, alimentan a la red eléctrica o funcionan como empresas independientes en los Estados Unidos. Si se compara con la energía hidroeléctrica generada, por ejemplo, los costos de energía en los Estados Unidos es de \$ 0.06 a 0.20/kWh para la hidroeléctrica y \$ 0.30 a 0.40/kWh para FV (Anon, 1994).

El desarrollo de energías renovables avanzadas puede servir como alternativas rentables y ambientalmente responsables a la generación de la energía convencional. Las energías renovables tienen técnica y potencial de mercado para aumentar significativamente la contribución actual a la demanda de energía. Lo que resulta en fuentes de empleo y beneficios económicos; muchas veces la inversión en

investigación y desarrollo (I + D). Muchas instituciones gubernamentales y agencias de energía reconocen esta oportunidad y apoyan los esfuerzos de su industria en energías renovables para aprovechar el potencial comercial a corto plazo de (Dincer, 1998b):

- Analizar oportunidades para crear energías renovables y abrir fuentes de trabajo en consultando a la industria para identificar prioridades de (I+D) y estrategias de mercado para alcanzar los objetivos tecnológicos.
- Realizar (I+D) en cooperación con la industria para desarrollo y comercio de las tecnologías.
- Fomentar la aplicación de tecnologías de energía renovable a los posibles usuarios, incluidos los servicios públicos.
- Prestar apoyo técnico y asesoramiento a las asociaciones de la industria y los programas gubernamentales que fomentan el uso creciente de las energías renovables.

Con el fin de considerar lo que ofrecen las fuentes de energía renovables, como son beneficios económicos y ambientales, se presenta el siguiente conjunto de actividades que debe actuar en consecuencia (Tabla 1.2). Estas actividades también motivarán a los usuarios potenciales para considerar los beneficios al adoptar tecnologías de energías renovables. En apoyo al desarrollo de los mercados de corto plazo, un área clave de transferencia de tecnología es acelerar el uso de tecnologías de energías renovables en comunidades remotas de un país.

Algunos beneficios económicos y ambientales de las energías renovables se citan a continuación

- Investigación y desarrollo: Las prioridades de (I+D) debería ponerse en estrecha consulta con la industria para reflejar sus necesidades. La mayoría de la investigación se realiza a través de acuerdos de gastos compartidos a corto y mediano plazo.
- Socios en (I+D) deben incluir una variedad de partes interesadas en la industria energética, tales como empresas del sector privado, empresas de servicios públicos en todo el país, los gobiernos municipales y otros departamentos federales.
- Normas de desarrollo: Para el desarrollo de normas técnicas y de seguridad es necesario fomentar la aceptación de las tecnologías probadas en el mercado. Las normas de desarrollo debe llevarse a cabo en colaboración con las organizaciones que conforman las normas nacionales e internacionales, así como otros organismos reguladores.
- Transferencia de tecnología: Los resultados de (I+D) deben ser transferidos a través del patrocinio de talleres técnicos, seminarios y conferencias, así como mediante el desarrollo de manuales de capacitación y herramientas de diseño, y la publicación de informes técnicos.

## 1.4 POTENCIAL MUNDIAL Y REGIONAL DE LA BIOENERGÍA

Las evaluaciones más optimistas enfocadas a los recursos reportan un futuro potencial de bioenergía similar, en tamaño o incluso más grande que el actual consumo mundial de energía primaria. La evaluación de los recursos por parte del estudio de la USEPA (United States Environmental Protection Agency) ocupa un lugar excepcional, reportando un potencial máximo en 675 EJ/año. La razón es que la USEPA supone que los rendimientos en los campos de cultivo de muy alta energía tienen un futuro claro. El potencial máximo asume rendimientos que van de 46 Mg MS/(hrs\*año) en las zonas templadas a 99 Mg MS/ (hrs\*año) en las zonas tropicales (MS = materia seca). Los niveles promedio mundial de rendimiento (en 556 millones de hectáreas) están entre 30 Mg MS/(hrs\*año) para la estimación a la baja a 60 Mg MS/( hrs\*año) para la estimación alta. No hay justificación para tales niveles de rendimiento con la experiencia actual en la agricultura y la silvicultura. Sin embargo, cabe señalar, que la producción de bioenergía prevista en los escenarios en el estudio USEPA se ve obligado a niveles muy inferiores a los reportados para la evaluación de los recursos.

Sin embargo, hay evaluaciones enfocadas a los recursos que reportan potenciales de bioenergía muy bajos. Por ejemplo, la más baja estimación para el año 2050 (BATTJES: 47 EJ/año) es casi diez veces menor que el valor más alto estimado del año 2050 (FISCHER: 450 EJ/año). Sin embargo, las evaluaciones que se han enfocado en recursos parecen justificar los niveles de uso de la bioenergía que se presentan en los estudios impulsados por la demanda

### 1.4.1 Suministro regional de bioenergía

En muchos estudios se espera que los países en desarrollo (África, Medio Oriente, América Latina, y fuera de la OCDE países de Asia y Oceanía) contribuyan con la mayor parte de la oferta de bioenergía mundial, sobre todo a largo plazo. Por ejemplo, África produce alrededor de 13 y 22 años EJ/año de metanol (con alrededor de 22 y 34 EJ/año de la biomasa) en 2025 y 2050, respectivamente, pero sólo una cuarta y una tercera parte de este metanol se consume en la región. La mayoría de los estudios se han centrado en recursos que indican que grandes volúmenes de biomasa puede ser puestos a disposición de la energía en los países en desarrollo, pero la exportación a gran escala de biocombustibles a países industrializados puede requerirse por este potencial; ya que la demanda de bioenergía en los países en desarrollo será demasiado baja (por lo menos durante las próximas décadas).

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTOS DE ENERGÍA LA BIOMASA**

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más graves. La Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ONU 1992, artículo 2) pide... "La estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático...". Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera seguirán aumentando si no se realizan cambios importantes en la forma de utilizar los combustibles fósiles para proporcionar servicios de energía (Hoffert, 1998).

La biomasa tiene un potencial para convertirse en una de las principales fuentes de energía primaria a nivel mundial en los próximos siglos. Los modernos sistemas de bioenergía sugieren ser importantes contribuidores a los futuros sistemas de energía sostenible y al desarrollo sostenible en los países industrializados como en países en vías de desarrollo (Hall Do, 1997; Hall Do y Scrase, 1998; European Comisión, 1997; Kartha y Larson, 2000; Ravindranath y Hall, 1995; Reddy Akn, 1997; Johanson, 1993; UNSP/WEC 2001).

La producción de energía a partir de cultivos incluye esquemas de reducción de excedente de alimentos. Lo cual representa una oportunidad para hacer un uso productivo de esas tierras y la conversión de tierras de cultivo en exceso a la producción rentable de cultivos energéticos. Se sugiere como un camino hacia una eliminación de los subsidios agrícolas (Hall Do, 1997).

#### **2.1 ENERGÍA DE LA BIOMASA**

El potencial energético de la biomasa depende de la competencia entre los usos de los recursos de la biomasa, la competencia entre las tecnologías de energía alternativa y las fuentes primarias de energía. En el sentido económico, el potencial a largo plazo corresponde a una curva de oferta (oferta en función del precio) y la oferta real (la demanda). Entonces sería el resultado de la intersección la curva de oferta con una curva de demanda (demanda en función del precio). El estudio ideal por tanto tendría en cuenta toda la cadena que se presentó en la Figura 2.1. Sin embargo, la mayoría de estudios se han centrado en el suministro o al lado de la demanda. Dos categorías principales de orientación general se mencionan a continuación:

- Las evaluaciones que se basan en la dirección de la demanda analizan la competitividad de electricidad a partir de la biomasa y los biocarburantes; o estiman la cantidad de biomasa necesaria

para llegar a los objetivos en materia de energía exógena sobre el suministro de energía en un equilibrio climático (demanda).

- Las evaluaciones se centraron en la bioenergía total a partir de recursos y la competencia entre los usos diferentes de los recursos (la oferta lado).

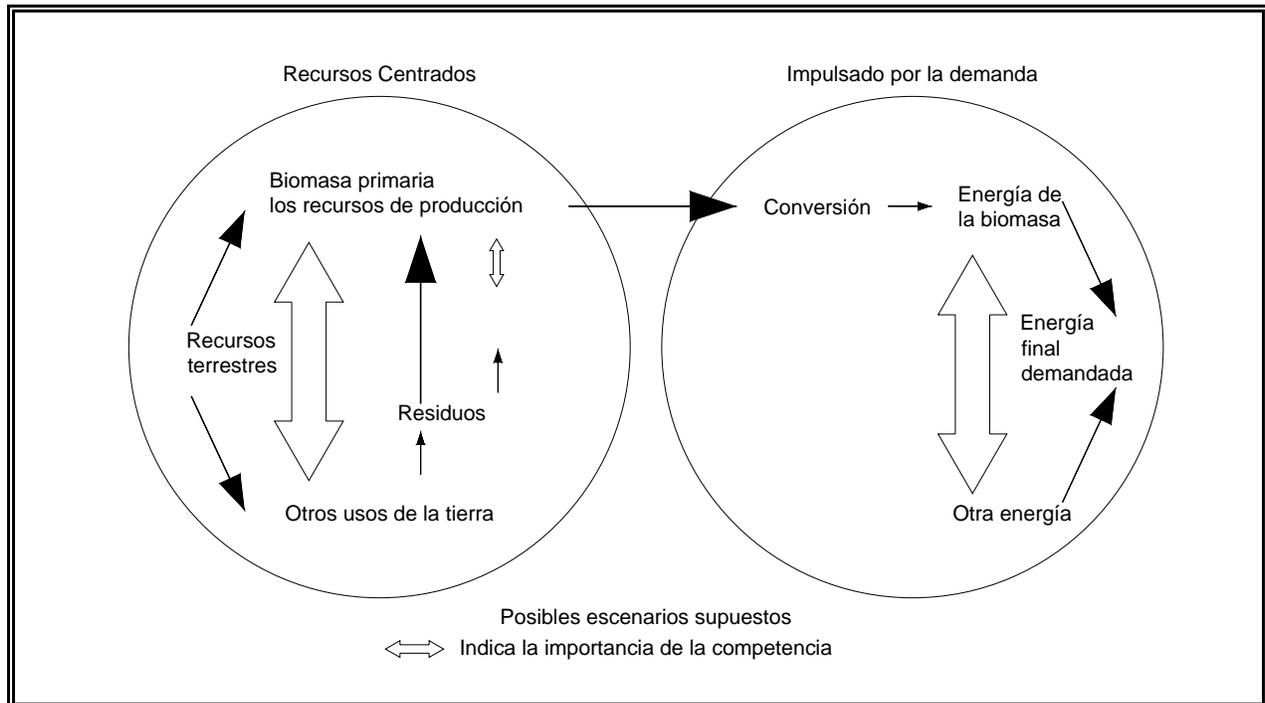


Figura 2.1 Caracterización de los estudios impulsados por la demanda y centrado en recursos naturales (Göran y col., 2003)

Se han llevado a cabo evaluaciones basadas en la demanda sin especificar cuáles son las fuentes de la bioenergía que se utilizan. Las opciones de bioenergía fueron caracterizadas en términos de desempeño de las correspondientes tecnologías energéticas y la disponibilidad de biomasa a un costo específico. Sin embargo, la mayoría de las evaluaciones basadas en la demanda incluyeron una evaluación de viabilidad de la oferta de bioenergía; que implícitamente involucró consideraciones de fuentes específicas a través de referencias a otros estudios de la posible contribución futura de la biomasa para obtener energía.

El crecimiento de la población y el desarrollo económico son los principales factores detrás de uso final de la energía. Las suposiciones sobre el desarrollo de la tecnología, la transformación de la energía y cambios en la intensidad de la actividad económica son factores que influyen la respuesta del uso final de la energía en la demanda para diferentes compañías de energía primaria. Además del desarrollo de las tecnologías de bioenergía, también es crucial el desarrollo de tecnologías de la no-bioenergía para la demanda de bioenergía final. Por ejemplo, los sistemas de energía solar y eólica representan una parte cada vez mayor del suministro de energía primaria del 2030 hasta 2100 en el estudio de empresas con

financiación extranjera. Esto alivia la demanda de los recursos no fósiles, no nucleares, como la bioenergía. Los dos escenarios ecológicamente impulsados en el estudio de IIASA-WEC exploran ampliamente diferentes caminos de la energía nuclear y en consecuencia diferentes demandas de otras fuentes de energía primaria tales como bioenergía.

Las evaluaciones enfocadas a los recursos tomaron la forma de inventarios de las fuentes potenciales de bioenergía, con una evaluación de las posibilidades para utilizar las fuentes con fines energéticos. Los alimentos y materiales de la demanda y la eficiencia del uso del suelo en la agricultura y la silvicultura, determinan las necesidades de tierra para obtener alimentos y materiales de producción y por lo tanto la disponibilidad de tierras para otros fines, tales como la producción de cultivos energéticos. La demanda de alimentos, materiales y tecnologías para la recolección y procesamiento de la biomasa en productos también determinan la disponibilidad de los residuos y subproductos para su uso como materia prima para la bioenergía de producción.

## **2.2 BIOCOMBUSTIBLES**

El término biocombustibles se refiere a los combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que en su mayoría son producidos a partir de materias primas bio-renovables. Hay dos combustibles líquidos mundiales bio-renovables para transporte que podrían reemplazar a la gasolina y al diésel; estos son el bioetanol y el biodiésel. El bioetanol es un buen combustible alternativo que se produce en su totalidad de los cultivos de alimentos (Börjesson, 2009; Tan y col., 2009; Hammond y col., 2008). El biodiésel se ha vuelto más atractivo recientemente debido a sus beneficios ambientales (Najafi y col., 2009). Los biocombustibles pueden ser clasificados en función de las tecnologías de su producción: Biocombustibles de primera generación (BPG), biocombustibles de segunda generación (BSG), biocombustibles de tercera generación (BTG), y biocombustibles de cuarta generación (BCG). La Tabla 2.1 muestra la clasificación de los biocombustibles renovables basados en tecnologías de su producción.

Los BPG se refieren a los biocarburantes producidos a partir de azúcar, almidón, aceites vegetales o grasas animales mediante la tecnología convencional. Los BPGS producidos a partir de cultivos de alimentos como los cereales, el azúcar, semillas de remolacha y semillas de aceite son limitados en su capacidad para alcanzar las metas para la sustitución del petróleo y derivados, la mitigación del cambio climático, y el crecimiento económico. Una posible excepción que parece conocer a muchos de los criterios aceptables es el bioetanol producido a partir de caña de azúcar.

GENERACION	MATERIA PRIMA	EJEMPLO
Primera generación de biocombustibles	Azúcar, almidón, aceites vegetales o grasas animales	Bioalcoholes, aceite vegetal, biodiésel, biogás de síntesis, el biogás
Segunda generación de biocombustibles	Cultivos no alimentarios, paja de trigo, maíz, madera, residuos sólidos, cultivos energéticos	Bioalcoholes, bioaceite, dimetilfurano (bio-DMF), biohidrógeno, biodiésel-Fischer-Tropsch, diésel madera
Tercera generación de biocombustibles	Algas	Aceite vegetal, biodiesel
Cuarta generación de biocombustibles	Aceite vegetal, biodiésel	Biogasolina

La materia prima básica para la producción de los BPG a menudo son las semillas o granos como el trigo, las cuales producen almidón que se fermenta en bioetanol, o de girasol, que se presionan para producir aceite vegetal que puede ser usado en la producción de biodiésel. La producción de BPG como el etanol de caña de azúcar en Brasil, el maíz de etanol en EE.UU., biodiésel de semillas oleaginosas en Alemania, y el biodiésel de aceite de palma en Malasia se caracteriza por madurar los mercados comerciales y ser bien asimilado por las tecnologías. Futuros objetivos y planes de inversión indican que un fuerte crecimiento continuará en el futuro próximo (Thamsiriroj y Murphy, 2009).

Los BSG producidos de las materias primas (gran cantidad) a partir de materiales lignocelulósicos incluyen paja de cereales, residuos de bosques, bagazo de caña y los cultivos específicamente energéticos, como la vegetación de pastos y bosques de corta rotación. Los BSG podrían evitar muchos de los problemas que enfrenta los BPG y potencialmente ofrecen la reducción de costos en el largo plazo. Muchos de los problemas asociados con los BPG pueden abordarse por la producción de biocombustibles a partir de residuos agrícolas y forestales y de materias primas no alimentarias de los cultivos. Los cultivos y los bosques de bajo costo, desechos de proceso de madera y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales pueden utilizarse como materias primas lignocelulósicas. Los BSG Y BTG son también llamados biocombustibles avanzados. Los BSG están hechos de cultivos no alimentarios, paja de trigo, maíz, madera, cultivos energéticos con tecnología avanzada. El combustible de algas, también llamado algastible (pilalgae) o BTG, es un biocombustible a partir de algas. Por otra parte, una aparición de cuarta generación se basa en la conversión de vegeaceites y biodiésel en la biogasolina utilizando la tecnología más avanzada (Demirbas, 2009e).

Muy recientemente, la conversión de biomasa renovable a biocombustibles líquidos se ha convertido en un método prometedor hacia el futuro (Demirbas, 2008 y 2009). El proceso de convertir biomasa a energía no es nuevo. Por ejemplo, la caña de azúcar ha sido utilizada en la producción de bioetanol desde 6000 AC. El ácido láctico fue descubierto por C. W. Scheele en 1780. El etanol ha sido utilizado por los seres humanos desde la prehistoria como ingrediente embriagador en las bebidas alcohólicas. Los antiguos egipcios produjeron alcohol por fermentación natural de materiales vegetales. También en la antigüedad, los chinos descubrieron el arte de la destilación, lo que aumenta la concentración de alcohol en soluciones fermentadas. Residuos secos en una cerámica de 9,000 años de antigüedad fueron encontrados en La República Popular de China. Su aislamiento del compuesto puro se obtuvo por primera vez por el alquimista persa, Zakariya Razi.

El etanol fue preparado por primera vez de forma sintética en 1826 a través los esfuerzos independientes de Henry Hennel en Gran Bretaña. El etanol fue usado como combustible para lámparas en los Estados Unidos en 1840. En la década de 70's, sin embargo, la industria del etanol comenzó a resurgir cuando el etanol fue utilizado como un suplemento de combustible durante la escasez de gasolina causada por los embargos de petróleo de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). El etanol ha sido utilizado en Alemania y Francia desde en 1894 por la entonces incipiente industria de los motores de combustión interna.

Brasil ha utilizado el etanol como un combustible desde 1925. Reseñas históricas tecnológicas y recursos industriales incluyen aspectos en los inicios de la producción de azúcar, la hidrólisis del almidón, sacarificación de la madera, la formación y la separación de la celulosa furfural, y la producción de celulosa, la síntesis de ácido levulínico, lípidos, vainillina de la lignina, la fermentación del ácido láctico. Algunos aspectos actuales de la bio-refinería de investigación y desarrollo desde el comienzo de la década de 1990 se presentan, revelando que los procesos integrados, las tecnologías de refinamiento de la biomasa y la tecnología de bio-refinería se han convertido en objetos de investigación y desarrollo. La estructura básica de toda la biomasa leñosa se compone de 3 polímeros orgánicos: Celulosa, hemicelulosa y lignina del tronco, follaje, y la corteza de árbol (Demirbas, 2008).

Tres son los componentes estructurales son la celulosa, hemicelulosa y lignina los cuales tienen fórmulas semejantes  $CH_{1.67}O_{0.83}$ ,  $CH_{1.64}O_{0.78}$  y  $C_{10}H_{11}O_{3.5}$ , respectivamente. La proporción de estos componentes de la madera varía entre especies, y hay diferencias entre frondosas y coníferas. Las especies frondosas tienen una mayor proporción de celulosa, hemicelulosa y extractos de maderas blandas, pero las coníferas tienen una mayor proporción de lignina. En general, las especies frondosas contienen alrededor del 43% de celulosa, 22% de lignina, y hemicelulosa 35%, mientras que las coníferas contienen alrededor de 43% de celulosa, el 29% de lignina, y hemicelulosa el 28% (en una de extracción-base libre). La mayor

diferencia entre la biomasa renovable y materias primas del petróleo es el contenido de oxígeno (Demirbas, 2009).

La biomasa renovable tiene niveles de oxígeno del 10% al 44% mientras que el petróleo no tiene ninguna de las propiedades químicas de los bio-renovables. Por ejemplo, los productos bio-renovables a menudo son más polares y algunos fácilmente degradables en agua y por tanto se pueden acidificar. Las plantas usan la fotosíntesis para convertir la energía solar en energía química. Se almacena en forma de aceites, carbohidratos, proteínas, etc. Esta energía de la planta se convierte en los biocombustibles. Por lo tanto los biocombustibles son principalmente una forma de energía solar. Para tener éxito, los biocombustibles en la sustitución de grandes cantidades de combustibles derivados del petróleo, la disponibilidad de materia prima tiene que ser lo más alta posible. Hay una necesidad urgente de diseñar bio-refinerías integradas que son capaces de producir combustibles para el transporte y productos químicos (Humbad y col., 2009; Demirbas, 2008; Hacısalıgoglu, 2009; Balat, 2009a; Demirbas, 2007a; Demirbas, 2009c).

La biomasa tradicional o "biomasa moderna" usada a través de una eficiente y limpia tecnología de combustión y la oferta sostenida de recursos de biomasa, combustibles medio ambientales y competitivos, calor y electricidad usan las modernas tecnologías de conversión. La biomasa, como fuente de energía, tiene dos características sorprendentes (Demirbas, 2007 y 2008).

La combustión directa y la co-combustión con carbón para la producción de electricidad han mostrado ser un método prometedor en el futuro próximo. Las tecnologías de conversión termoquímica de la biomasa como la pirólisis y gasificación ciertamente no son las opciones más importantes en la actualidad; la combustión es responsable de más del 97% de la producción de bioenergía del mundo (Balat, 2009a.). El etanol y los ácidos grasos (m) esterilíco (biodiésel) así como el diésel producido a partir de biomasa por la síntesis de Fischer-Tropsch (FTS) son modernos combustibles para el transporte basados en la biomasa. El combustible líquido para el transporte puede producirse por procesos de gasificación integrada de biomasa - Fischer-Tropsch (FT-GIB). La biomasa moderna excluye usos tradicionales de la biomasa como leña e incluye la generación eléctrica, producción de calor y combustibles líquidos para el transporte de los residuos agrícolas y forestales y residuos sólidos. Por otra parte, la "biomasa tradicional" se produce de manera no sostenible y es utilizada como una fuente no comercial usualmente con eficiencias muy bajas para cocinar en muchos países (Goldemberg y Coelho, 2004).

La biomasa se puede convertir en útiles biocombustibles y bioquímicos a través de un mejoramiento de la biomasa y las tecnologías de bio-refinería. Una bio-refinería es una instalación que

integra los procesos de conversión de biomasa para producir combustibles, energía y productos químicos a partir de la biomasa. Los procesos de mejoramiento de la biomasa incluyen fraccionamiento, licuefacción, pirólisis, hidrólisis, fermentación y la gasificación. Al mejorar el bioaceite de pirólisis de la biomasa se puede utilizar en motores de vehículos como combustible. Los beneficios de una bio-refinería integrada son numerosos debido a la diversificación de las materias primas y productos (Demirbas y Dincer, 2008; Demirbas, 2008d; Balat, 2007; Demirbas, 2008e.; Sigar y col., 2009; Dincer, 2008; Balat, 2008b; Demirbas, 2007c; Balat, 2008c; Demirbas, 2007d; Balat, 2009a; Demirbas, 2009d; Keskin, 2009; Balat, 2008d; Demirbas, 2008h; Mohan, 2006; Demirbas, 2008i; Demirbas, 2008j; Gercel, 2007; Demirbas, 2008k; Bakis, 2008; Demirbas, 2008L; Archer, 2008).

Actualmente hay distintos niveles de integración en las bio-refinerías los cuales contribuyen a su sustentabilidad, tanto económica como ambiental. La economía y ventajas en la producción aumentan con el nivel de integración en la bio-refinería (Balat, 2009a). La economía de una bio-refinería es una visión de un futuro en el que la biomasa renovable sustituye los combustibles fósiles. La transición a una economía de bio-refinería podría requerir enormes inversiones en nuevas infraestructuras para producir, almacenar y entregar productos de bio-refinería a los usuarios finales. Hay cuatro bio-refinerías principales: gas de síntesis, pirólisis, hidrotermal y fermentación. El gas de síntesis es un intermediario de múltiples funciones para la producción de materiales, productos químicos, combustibles para el transporte, la energía, y/o calor a partir de la biomasa. Combinando productos de mayor valor con la producción de combustibles de mayor valor calórico y el empleo de cualquier combinación de tecnologías de conversión se tiene el mayor potencial para la fabricación de combustibles, productos químicos, materiales y la energía de la biomasa competitivos. La obtención de biocombustibles modernos, bioenergía y bio-productos a partir de la biomasa sólo puede realizarse en las bio-refinerías integradas. Las bio-refinerías también usarán sólo las plataformas tecnológicas que son más rentables para la conversión de determinados tipos de biomasa en la colecta de productos finales deseados. El desarrollo de las tecnologías de bio-refinería es importante y estas tecnologías son muy prometedoras.

### **2.2.1 Tecnologías de valorización de fraccionamiento de la madera y de madera de biomasa**

El fraccionamiento de la biomasa se refiere a la conversión de la madera en sus componentes constituyentes (celulosa, hemicelulosa y lignina). Los procesos incluyen la explosión del vapor, la separación acuosa y los sistemas de agua caliente. Los productos comerciales de fraccionamiento de biomasa incluyen ácido levulínico, xilitol y alcoholes. La Figura 2.2 muestra los principales componentes en la biomasa vegetal. La Figura 2.3 muestra el fraccionamiento de la madera y algunos productos químicos de la madera.

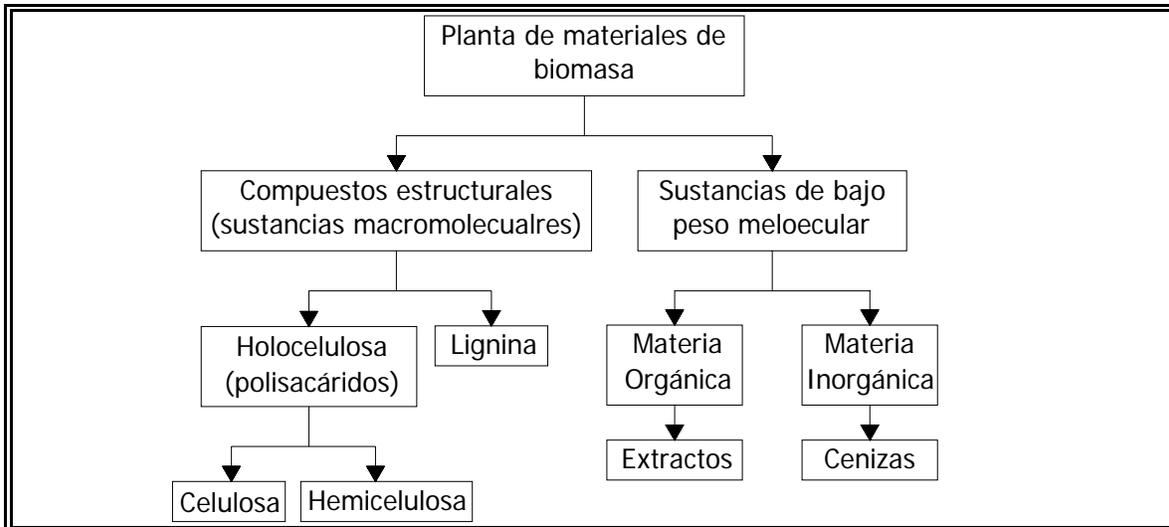


Figura 2.2 Principales componentes de la plantas de biomasa (Demirbas, 2009)

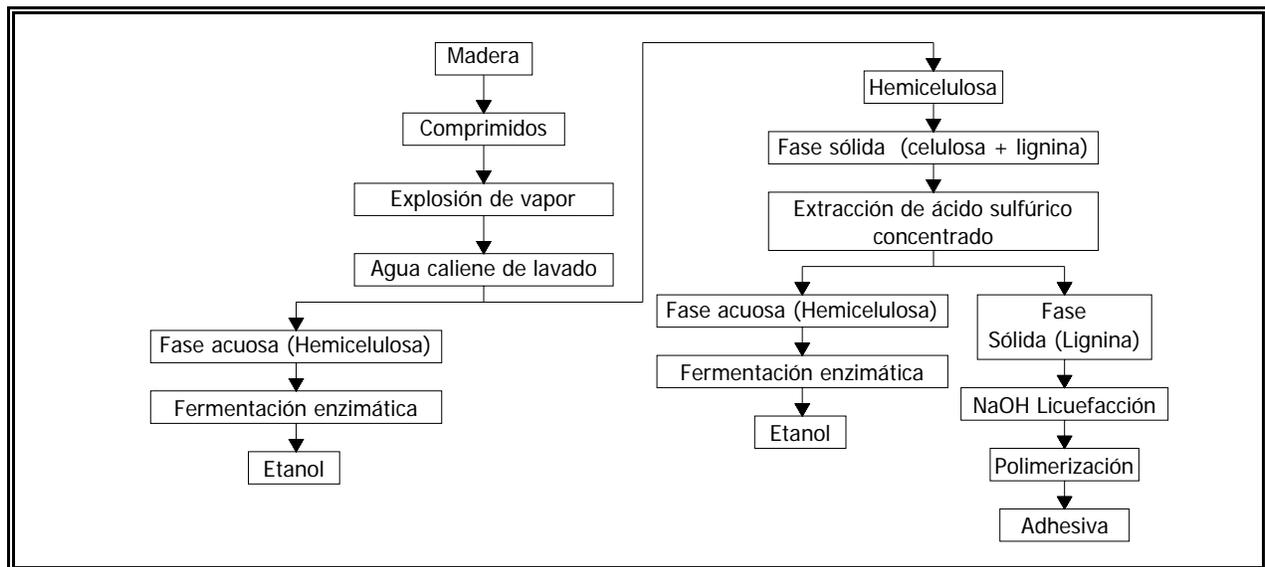


Figura 2.3 El fraccionamiento de la madera y algunos productos químicos de la madera (Demirbas, 2009)

Los principales productos químicos del fraccionamiento de la madera son:

1. La disociación de los componentes celulares → Fragmento de lignina + Oligosacáridos + celulosa
2. Degradación química de la celulosa → Ácido Levulínicos + xilitol
3. Degradación química de la lignina → Productos fenólicos
4. La hidrólisis de la celulosa (sacarificación) → Glucosa
5. La conversión de la glucosa (fermentación) → Ácido láctico + etanol

La Tabla 2.2 muestra las tecnologías principales de valorización de la madera. La conversión de la madera en productos químicos para la producción de la mayoría de plásticos sintéticos, fibras y gomas es técnicamente factible.

Los aceites sintéticos de la licuefacción de la madera pueden servir como materia prima para craqueo a los productos químicos de la misma manera que el petróleo crudo se utiliza actualmente. Un examen exhaustivo actual se centra en la evolución reciente de la madera, pirólisis de la biomasa y los informes de las características de la resultante de bioaceites, que son los principales productos de la pirólisis rápida de la madera (Mohan, 2006). La pirólisis rápida utiliza la madera para producir un producto que se utiliza como fuente de energía y materia prima para la producción de sustancias químicas. Se han hecho considerables esfuerzos para convertir la madera en combustibles líquidos y productos químicos desde la crisis petrolera en los 70's.

Tabla 2.2 Principales tecnologías de valorización de la madera (Demirbas, 2009)	
Valorización	Beneficios y productos
Material de madera usado en	Postes mineros y postales
Combustión directa	Calefacción doméstica, aparatos de calefacción, energía de generación
Densificación (briquetas)	Facilitar el transporte, almacenamiento de calor, y la energía
Artesonado con carbón	Combustión productiva, reducción de gases peligrosos
Carbonización destructiva	Carbón de leña, aplicaciones industriales, combustible sólido
Deslignificación de pasta	Pulpa y papel, fibras, licor negro, derivados de lignina
Procesamiento de celulosa	Plásticos, fibras de nylon, microfilms, carboximetilcelulosa
Procesamiento de lignina	Resinas fenólicas, adhesivos, productos químicos
Hidrólisis de carbohidratos	Azúcares
Fermentación de los azúcares	Carburantes, etanol, metanol, butanol
Licuefacción hidrotermales	CxHx, combustible diésel, productos químicos
Pirólisis	Bio-oil, carburantes, productos químicos, sólidos y productos gaseosos
Gasificación	Gas de síntesis, hidrógeno, CxHy, combustible diésel, productos químicos
Extracción de agua supercrítica	Productos químicos, combustibles
Digestión	Metano

### 2.2.2 Bio-refinerías

Una "bio-refinería" es un modelo conceptual para la futura producción de biocombustibles. Ahí se producen tanto los combustibles y productos materiales de alto valor. El concepto de bio-refinería se

aplica a la conversión de biomasa con los mismos métodos que se han aplicado a la refinación de petróleo. Las bio-refinerías producirían simultáneamente biocombustibles así como los productos químicos de base biológica, calor, y electricidad. Las bio-refinerías presentarían una opción más económica donde los productos químicos de base biológica serían co-productos del combustible líquido. Las bio-refinerías del futuro podrían imitar la eficiencia energética de las refinerías de petróleo modernas a través de una amplia integración de aprovechamiento de calor y desarrollo de co-productos al desarrollo de productos. El calor que se libera de algunos procesos dentro de la bio-refinería podría utilizarse para conocer las demandas de calor para otros procesos en el sistema.

### **2.2.3 Principales deficiencias y obstáculos técnicos y no técnicos de las bio-refinerías**

Hay mucho de deficiencias técnicas y no técnicas y barreras relacionadas con la aplicación y comercialización de una bio-refinería. Obstáculos técnicos actuales se encuentran al usar cultivos energéticos asociados a los costos de producción, las dificultades en la cosecha y almacenamiento, sobre todo para los cultivos anuales o de otro tipo que deben ser recolectadas dentro de un período de tiempo limitado en el otoño. Los costos de transporte son de vital importancia en el cálculo de costos globales de la biomasa; por lo que la producción local o regional de la biomasa es más favorable. Otros problemas técnicos asociados con la producción de cultivos energéticos incluyen el suministro de nutrientes y el control de plagas y enfermedades.

Las principales barreras no técnicas son las restricciones o las reivindicaciones sobre el uso de la tierra (alimentación, energía, uso de ocio, vivienda, comercio, la industria, el ocio o las designaciones como áreas de belleza natural, especial interés científico, etc.), así como los efectos ambientales y ecológicos de grandes extensiones de monocultivo. Por ejemplo, los aceites vegetales son una fuente renovable y potencialmente inagotable de la energía con un potencial energético cercano al del combustible diésel (Demirbas, 2009e). Por otra parte, un amplio uso de los aceites vegetales puede causar otros problemas importantes tales como el hambre en los países en desarrollo. Los combustibles de aceite vegetal no son aceptables porque son más caros que los combustibles derivados del petróleo.

Son pocos los obstáculos técnicos en lo que se refiere a la construcción de las instalaciones de biomasa en cualquier escala. Desde domésticas alrededor de 50 MW, a partir del cual consideraciones de la disponibilidad y el costo de proveer de combustible se vuelve significativo. En general, la capacidad y la eficiencia de la generación de plantas de biomasa es considerablemente inferior a los modernos sistemas de turbina de gas natural. Las principales limitaciones no técnicas en sistemas más grandes son de carácter económico, o en algunos países reflejan las condiciones de la planificación y la opinión pública,

donde una clara distinción no puede hacerse entre una planta de energía de biomasa efectiva moderna y viejos diseños de incineradores contaminantes.

Diseños fiables de los equipos para los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa aún no se han demostrado ampliamente y se muestra ser capaz de producir gas de síntesis continuamente de la calidad requerida. El gas de síntesis tiene que estar libre de nitrógeno, lo que requiere el uso de oxígeno (caro), un proceso pirolítico optimizado para el gas o un proceso de varias etapas. Los principales obstáculos no técnicos a la aceptación de los biocombustibles líquidos, especialmente en el sector del transporte, se refieren a los costos de producción, los mercados disponibles, las políticas fiscales y la legislación así como las mezclas y la distribución. Desde el punto de vista económico el uso de cultivos agrícolas, sin subsidio, es demasiado caro ya sea para producir bioetanol o biodiésel a un precio competitivo con gasolina libre de impuestos o el combustible diésel. Mientras que los procesos para el uso de menor costo materiales lignocelulósicos no se han perfeccionado (Börjesson, 2009; Tan y col., 2009; Hammond y col., 2008; Najafi y col., 2009).

## **2.3 PROCESOS DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE BIO-RENOVABLES**

Los principales procesos de conversión termoquímica son la pirólisis, la gasificación, y licuefacción. Materias primas bio-renovables se pueden convertir en forma líquida o gaseosa para la producción de energía eléctrica, calor, productos químicos o combustibles gaseosos y líquidos (Demirbas, 2008i; Demirbas, 2008j; Gercel, 2007). La Figura 2.4 muestra los tipos y clasificación de los procesos de conversión de biomasa. Los principales procesos de conversión de biomasa son de licuefacción directa, licuefacción indirecta, la extracción física, la conversión termoquímica, conversión bioquímica y la conversión electroquímica (Demirbas, 2008k; Bakis, 2008; Appel y col., 1971).

La pirólisis es el proceso de reacción química fundamental que es la precursora tanto de la gasificación y la combustión de combustibles sólidos, y se define simplemente como los cambios químicos que ocurren cuando el calor se aplica a un material en ausencia de oxígeno. La gasificación de biomasa para su uso en motores de combustión interna para la generación de energía proporciona un importante recurso de energía alternativa renovable.

La gasificación es la combustión parcial de la biomasa para producir gas y reducción de materia en la primera etapa y la posterior de los gases de producto, principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , por el carbón en  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ . El proceso también genera algo de metano y otros hidrocarburos superiores dependiendo del diseño y condiciones de operación del reactor (Marbe y Harvey, 2006; López y col., 2009). La Figura 2.5 muestra una visión general de las rutas de conversión de los materiales de las plantas a biocombustibles.

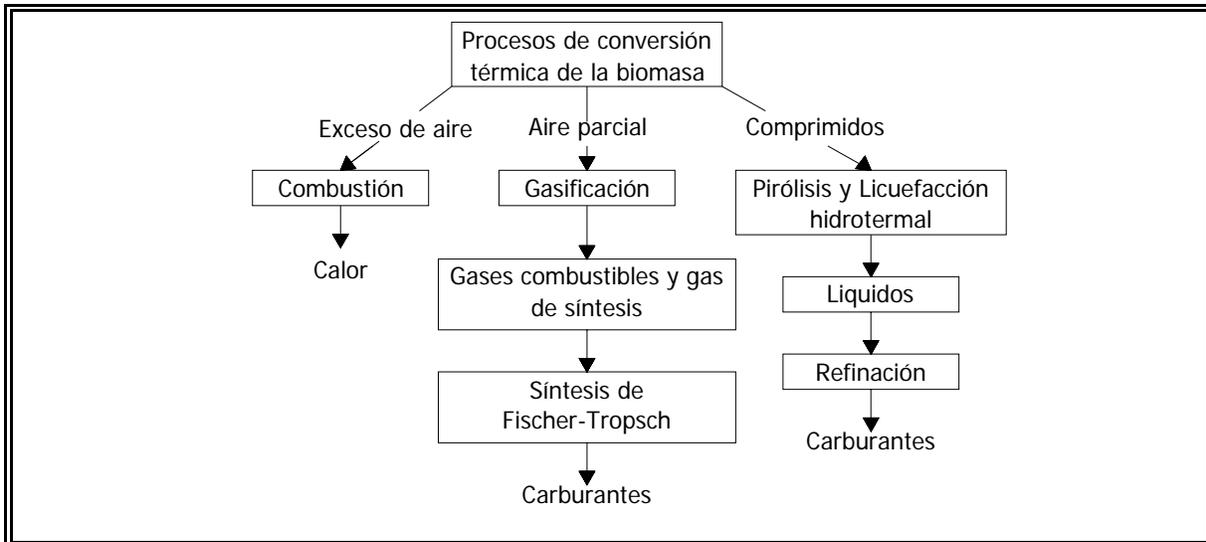


Figura 2.4 Procesos de conversión de biomasa térmica (Demirbas, 2009)

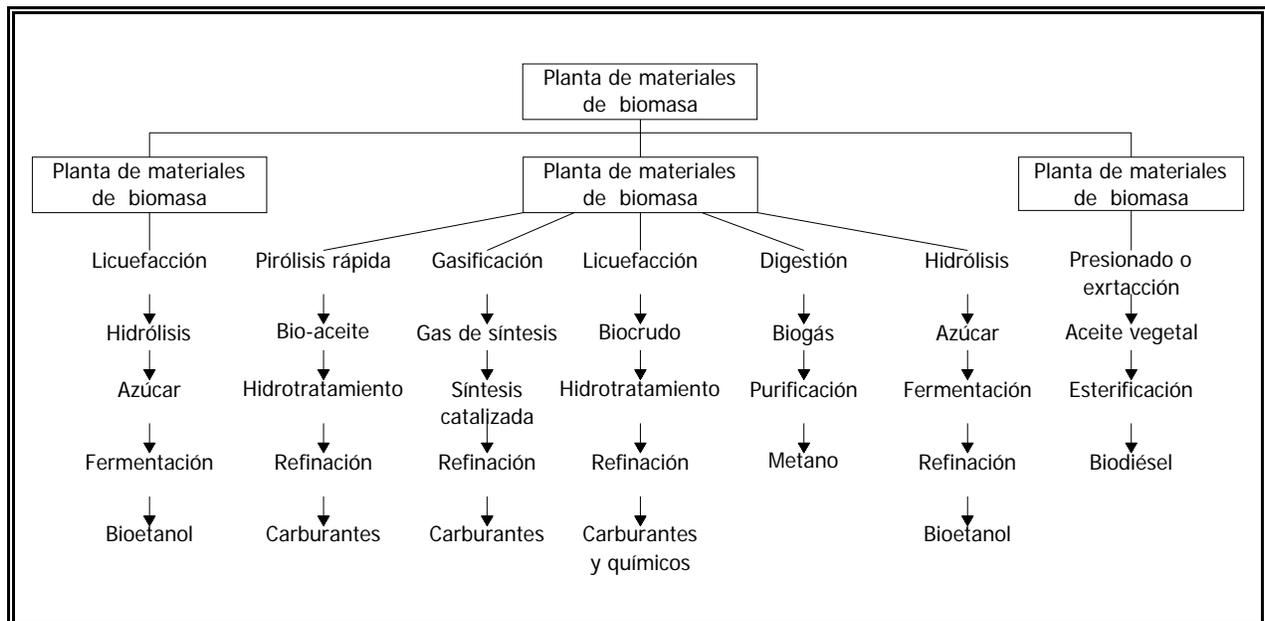


Figura 2.5 Descripción de los procesos de conversión de materias vegetales para (Demirbas, 2009)

Los grupos químicos que se pueden obtener a partir de la biomasa bio-aceite por pirólisis rápida son: ácidos, aldehídos, alcoholes, azúcares, ésteres, cetonas, fenoles, compuestos oxigenados, hidrocarburos, y los esteroides. Los bio-aceites se componen de una serie de ciclopentanona, metoxifenol, acético ácido, metanol, acetona, furfural, fenol, ácido fórmico, levoglucosano, guaiacol y sus derivados fenólicos alquilados. El ácido acético se forma de la descomposición térmica de los tres componentes principales de la biomasa. En las reacciones de pirólisis de la biomasa: El agua es formada por la deshidratación; el ácido acético proviene de la eliminación grupos acetilo inicialmente vinculados a la unidad de xilosa; el furfural se forma por la deshidratación de la unidad de xilosa; el ácido fórmico

procede de los grupos carboxílicos del ácido urónico y el metanol surge de grupos metoxilo de ácido urónico (Balat, 2009b; Balat, 2008b; Molten y col., 1983).

Los procesos relativos a la licuefacción de la biomasa se basan en las primeras investigaciones de Appell y col. (1971). Estos investigadores reportaron que una variedad de biomasa como desechos agrícolas y urbanos puede ser convertidos, parcialmente, en un producto parecido al petróleo pesado por la reacción con agua y monóxido de carbono/hidrógeno en presencia de carbonato de sodio. La pirólisis y la licuefacción directa son a veces confundidos con los demás procesos. Ambos son procesos termoquímicos en los que compuestos orgánicos como materia prima se convierten en productos líquidos. En el caso de la licuefacción, compuestos macro-molécula de materia prima se descomponen en fragmentos de moléculas ligeras en presencia de un catalizador adecuado. Al mismo tiempo, estos fragmentos, que son inestables y reactivos, repolimerizan en compuestos aceitosos teniendo adecuados pesos moleculares (Balat, 2009b). Con la pirólisis, un catalizador es generalmente innecesario, y los fragmentos compuestos ligeros se convierten en compuestos aceitosos a través reacciones homogéneas en la fase gaseosa.

La pirólisis convencional se define como la pirólisis que se produce con una velocidad de calentamiento lento. Esta condición permite la formación de productos de pirólisis sólidos, líquidos y gaseosos en porciones significativas. La pirólisis lenta convencional se ha aplicado desde hace miles de años y se ha utilizado principalmente para la producción de carbón vegetal. La velocidad de calentamiento en la pirólisis convencional suele ser mucho más lenta que la utilizada en la pirólisis rápida. Una materia prima se puede mantener a un temperatura constante o ser calentada lentamente. Los vapores pueden ser continuamente eliminados así como se forman. La pirólisis lenta de la biomasa se asocia con carbón vegetal, pero la pirólisis rápida se asocia con alquitrán, a baja temperatura (675-775 K), y/o gas, a temperatura alta.

En la actualidad, la tecnología preferida es la pirólisis rápida o flash a altas temperaturas con tiempos de residencia muy cortos (Demirbas, 2008k). La pirólisis rápida (mejor definida como termólisis) es un proceso en la que un material, como la biomasa, se calienta rápidamente a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (Demirbas, 2008k). La pirólisis flash de la biomasa es el proceso termoquímico que convierte pequeñas partículas secas de biomasa en un combustible líquido (bio-aceite o biocrudo) por casi 75%, y los gases no condensables y las cenizas de carbón por calentamiento de la biomasa a 775 K en ausencia de oxígeno. Las cenizas en la fase de vapor catalizan grietas secundarias. La pirólisis de la biomasa es atractiva porque la biomasa y los desechos sólidos se pueden convertir fácilmente en productos líquidos. Estos líquidos, como crudo bio-aceite, lodo de ceniza o aceite tienen ventajas en

transportarse, almacenarse, en ser combustibles, adaptarse y ser flexibles en la producción y su comercialización.

Un rápido calentamiento y rápido enfriamiento producen los productos líquidos intermedios de la pirólisis, que se condensan antes que más reacciones rompan en especies de mayor peso molecular en productos gaseosos. Las altas tasas de reacción minimizan la formación de ceniza de carbón. A mayores temperaturas de pirólisis rápida, el producto principal es el gas. Si el propósito es maximizar el rendimiento de productos líquidos derivados de la pirólisis de la biomasa, la baja temperatura y tasa alta de calentamiento, sería necesario un corto tiempo de residencia de los gases. Para una producción de alto carbón, un proceso a mínima temperatura, baja velocidad de calentamiento sería elegido. Si el propósito fuera para maximizar el rendimiento de gas combustible resultante de la pirólisis, una alta temperatura y tasa baja de calentamiento, sería necesarios un largo tiempo de proceso de residencia (Demirbas, 2008k). La Tabla 2.3 muestra los productos de carbón, líquidos y gaseosos de la biomasa vegetal por pirólisis y gasificación. Se cree que a medida que progresa la reacción de la pirólisis del carbón de residuos (semi-carbón) se vuelve menos reactivo y estable en las formas de estructura química, y por lo tanto aumenta la energía de activación como el nivel de conversión de la biomasa crece.

Los líquidos de la pirólisis se forman por el rápido y al mismo tiempo despolimerizado y fragmentado de celulosa, hemicelulosa y lignina, con un rápido aumento de la temperatura. La Figura 2.6 muestra el fraccionamiento de los productos de la pirólisis de la biomasa.

La gasificación de la biomasa es un tratamiento térmico, el cual resultan productos gaseosos y pequeñas cantidades de carbón y cenizas. La gasificación se realiza a altas temperaturas para optimizar la producción de gas. El gas resultante, conocido como productor de gas, es una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, junto con el dióxido de carbono y nitrógeno. La mayoría de los sistemas de gasificación de la biomasa utilizan el aire o el oxígeno en la oxidación parcial o procesos de combustión. La producción de gas producto de la descomposición térmica se compone de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, otros gases hidrocarburos, alquitrán, carbón, componentes inorgánicos y la ceniza.

La composición del gas producto de la gasificación de la biomasa depende en gran medida del proceso de gasificación, el agente de gasificación y la composición de las materias primas (Balat, 2009b; Balat, 2008c). Suponiendo un proceso de gasificación con biomasa como materia prima, el primer paso del proceso es una descomposición termoquímica de la celulosa, hemicelulosa y lignina con la producción de compuestos de carbón y volátiles. Además de la gasificación de carbón y algunas de las reacciones de equilibrio se producen otras. Posibles productos obtenidos del proceso de gasificación se muestran en la Figura 2.7

DEGRADACION TÉRMICA	TIEMPO DE RESIDENCIA	TEMPERATURA MÁXIMA [K]	CARBÓN	LÍQUIDO	GAS
PIRÓLISIS LENTA	200	600	32-38	28-32	25-29
	90	750	26-32	27-34	33-37
	30	950	22-28	23-29	40-48
PIRÓLISIS RÁPIDA	5	700	22-27	53-59	12-16
	3	800	14-19	65-72	14-20
	1	950	9-13	64-71	17-24
GASIFICACIÓN	1,500	1,250	8-12	4-7	81-88

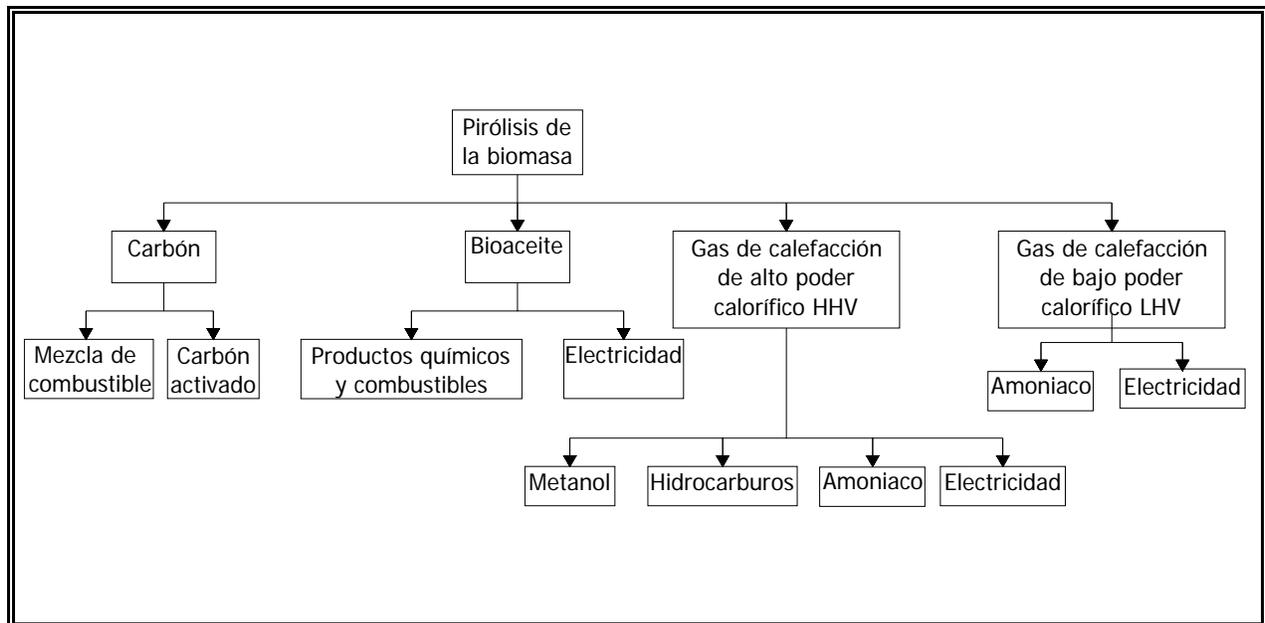


Figura 2.6 Descripción de los procesos de conversión de materias vegetales para biocombustibles (Demirbas, 2009)

En el proceso de licuefacción, la biomasa se convierte en productos licuados a través de una secuencia compleja de la estructura física y cambios químicos. En la licuefacción, la biomasa se descompone en moléculas pequeñas. Estas pequeñas moléculas son inestables y reactivas, y pueden repolimerizarse en compuestos aceitosos con una amplia gama de distribución del peso molecular. La licuefacción hidrotermal (HTL) o licuefacción directa es una tecnología prometedora para el tratamiento de los flujos de residuos que provienen de fuentes diversas y producir bioproductos valiosos como biocrudos (Balat, 2009b; Balat, 2008b; Balat, 2008c).

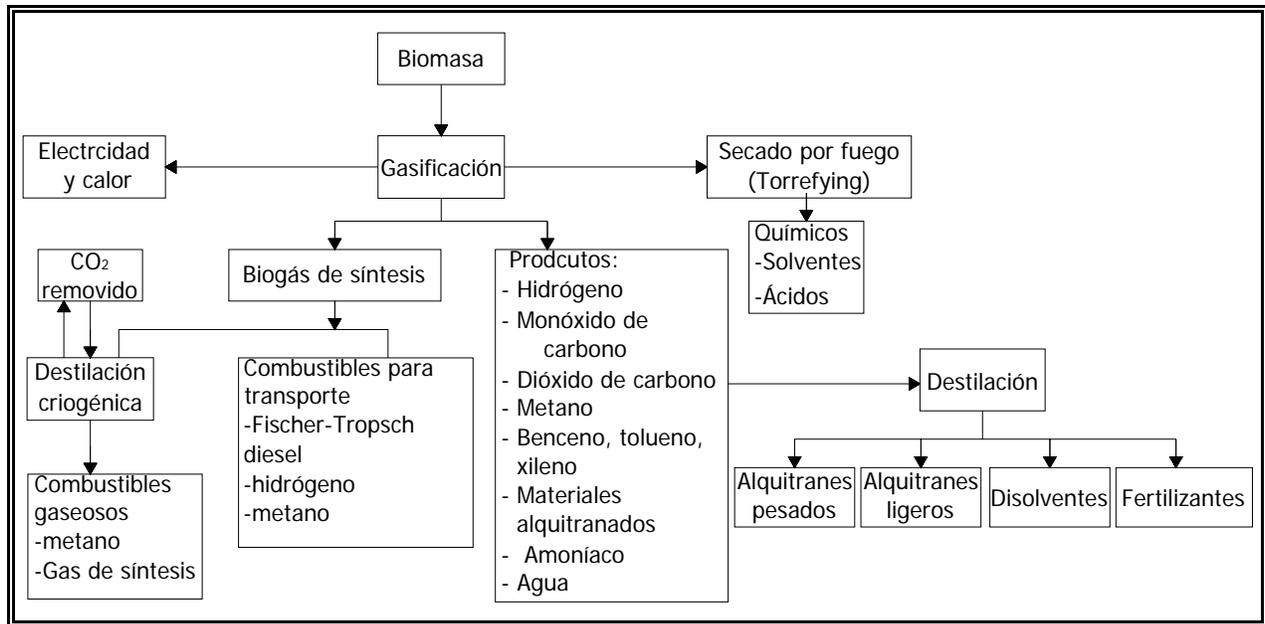


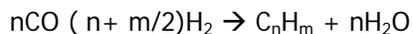
Figura 2.7 Productos del proceso de gasificación (Demirbas, 2009)

En el proceso de mejora hidrotermal (HTU), la biomasa se hace reaccionar con agua líquida a temperatura y presión elevadas. El equilibrio de fases en el proceso (HTU) es muy complicado debido a la presencia de agua, dióxido de carbono supercrítico, alcoholes, así como el llamado bio-crudo. El bio-crudo es una mezcla con una amplia gama de distribución del peso molecular y consiste de varios tipos de moléculas. Contiene 10-13% de oxígeno. Se mejora por hidroxigenación catalítica en una instalación central.

Los estudios preliminares sobre el proceso de conversión de biomasa en varios tipos en combustibles líquidos han indicado que HTU es más atractivo que la pirólisis o gasificación. En el HTU la biomasa, típicamente un 25% de mezcla en agua, es tratada a temperaturas de 575-625 K y presiones de 12-18 MPa en presencia de agua líquida durante 5 a 20 minutos para producir una mezcla de líquido biocrudo, gas (principalmente  $\text{CO}_2$ ) y agua. El proceso subsecuente puede ser capaz de mejorar el biocrudo a biocarburantes utilizables (Demirbas, 2008i).

### 2.3.1 Síntesis Fischer-Tropsch (SFT) a partir de bio-renovables

La síntesis Fischer-Tropsch (SFT) de gas se obtiene mediante la gasificación de la biomasa. La SFT fue establecida en 1923 por los científicos alemanes Franz Fisher y Hans Tropsch. El objetivo principal de la SFT es síntesis de hidrocarburos de cadena larga a partir de  $\text{CO}$  y la mezcla de gas  $\text{H}_2$ . La SFT es descrita por el conjunto de ecuaciones (Anderson, 1984; Schulz, 1999; Sie y Krishna, 1999; Tijmensen y col., 2002):



Donde  $n$  es la duración media de la cadena de hidrocarburos y es el  $m$  número de átomos de hidrógeno por carbono. Todas las reacciones son exotérmicas y el producto es una mezcla de diferentes hidrocarburos en el que la parafina y olefinas son las partes principales. El gas de síntesis incluye principalmente, hidrógeno y monóxido de carbono que también se conoce como gas de síntesis ( $\text{H}_2 + \text{CO}$ ). El metanol puede ser producido a partir de mezclas de óxidos de carbono-hidrógeno, por medio de la reacción catalítica de monóxido de carbono y algunos de dióxidos de carbono con el hidrógeno. La catálisis de cobre-zinc y cromo-zinc se utiliza en la producción de metanol industrial. El gas de síntesis es un gas rico en  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$  obtenido por la gasificación de biomasa.

Los productos de la SFT son principalmente alifáticos de cadena lineal hidrocarburos ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ). Además los  $\text{C}_x\text{H}_y$  también hidrocarburos ramificados, hidrocarburos no saturados y los alcoholes primarios se forman en cantidades menores. La distribución de los productos obtenidos a partir de SFT incluye los hidrocarburos ligeros de metano ( $\text{CH}_4$ ), eteno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) y etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), GLP ( $\text{C}_3$ - $\text{C}_4$ , propano y butano), gasolina ( $\text{C}_5$ - $\text{C}_{12}$ ), diésel ( $\text{C}_{13}$ - $\text{C}_{22}$ ), y ligeros y las ceras ( $\text{C}_{23}$ - $\text{C}_{33}$ ). La distribución de los productos depende del catalizador y los parámetros del proceso tales como la temperatura, presión y el tiempo de residencia. El gas de síntesis es una materia prima para la síntesis a gran escala para la producción importante de productos base de la química orgánica. Las reacciones fundamentales de la química del gas de síntesis son el metanol, la síntesis de Fischer-Tropsch (SFT), la síntesis oxo (hidroformilación) y la síntesis de metano (Prins y col., 2004). La biomasa se puede convertir en gas de síntesis por los procesos no catalíticos, catalíticos y la gasificación de vapor. La composición de biogás de síntesis a partir de gasificación de la biomasa se da en la Tabla 2.4 Las condiciones típicas de operación para la SFT son una temperatura rango de 475 a 625 K y presiones de 15-40 bar, en función del proceso. Todas las reacciones son exotérmicas.

El tipo y la cantidad de producto líquido obtenido es determinado por la temperatura de reacción, presión, tiempo de residencia, el tipo de reactor y el catalizador que se utiliza. Los catalizadores de hierro tienen una mayor tolerancia de azufre, son más baratos y producen más productos de olefinas y alcoholes.

Sin embargo, la vida útil de los catalizadores de Fe es corta y en instalaciones comerciales generalmente se limita a 8 semanas. Los catalizadores de cobalto tienen la ventaja de una tasa de conversión más elevada y una vida más larga (más de 5 años). Los catalizadores de Co son en general más reactivos para la hidrogenación y producción de hidrocarburos por lo tanto menos saturados y alcoholes de

hidrocarburos y alcoholes en comparación con los catalizadores de hierro. La Figura 2.8 muestra la producción de diésel a partir de gas de síntesis por SFT.

COMPONENTES	% POR VOLUMEN (SECO Y LIBRE DE NITROGENO)
Monóxido de carbono (CO)	28-36
Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	22-32
Dióxido de carbono	21-30
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.84-0.96
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0.16-0.22
Benceno-Tolueno-Xileno (BTX)	0.84-0.96
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	0.16-0.22
Alquitrán	0.15-0.24
Otros (NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, HCL, polvo, ceniza, etc.)	<0.021

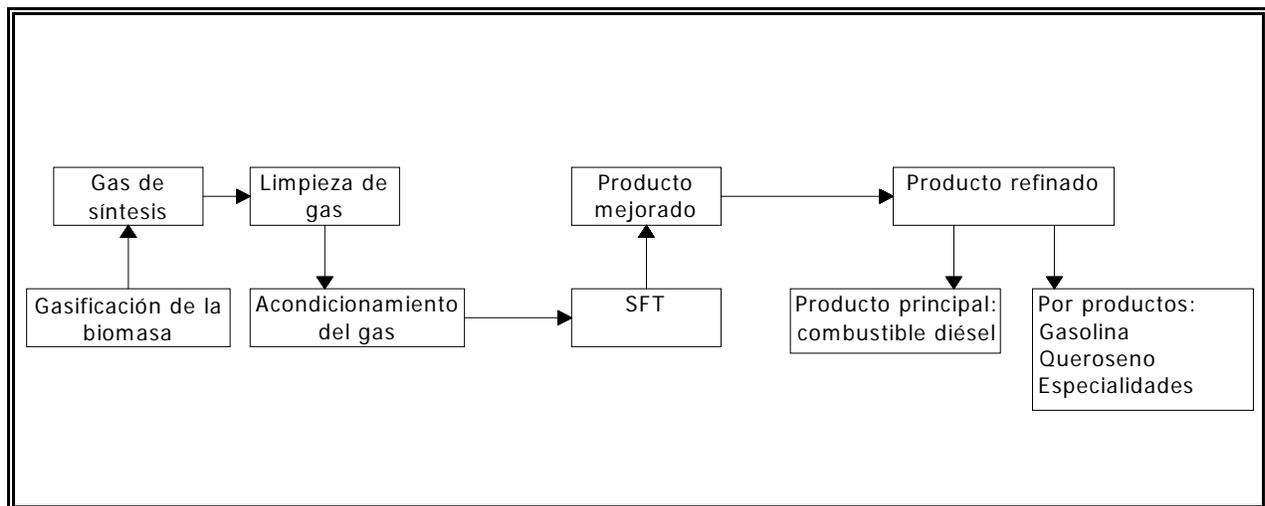


Figura 2.8 Producción de combustible diésel de biogás de síntesis por síntesis Fischer-Tropsch (SFT) (Demirbas, 2009)

El diseño de un gasificador de biomasa integrado con un reactor de SFT debe estar dirigido a conseguir un alto rendimiento de hidrocarburos líquidos. Para el gasificador, es importante evitar la formación de metano tanto como sea posible, y convertir todo el carbón de biomasa principalmente monóxido de carbono y dióxido de carbono (Prins y col., 2004). La limpieza del gas es un proceso importante antes de la SFT. La limpieza de los gases es aún más importante para la integración de un gasificador de biomasa y un reactor catalítico. Para evitar el envenenamiento del catalizador de SFT, alquitrán, sulfuro de

hidrógeno, sulfuro de carbonilo, de amoníaco, cianuro de hidrógeno, alcalinos y partículas de polvo deben ser removidos completamente (Tijmensen y col., 2002).

## 2.4 PROCESOS BIOQUÍMICOS DE CONVERSIÓN

La producción de bioetanol es una tecnología de conversión bioquímica de biomasa para producir energía. Para la producción de etanol, los investigadores de conversiones bioquímicas se han centrado en un modelo de proceso de hidrólisis ácida de hemicelulosas seguido por hidrólisis enzimática de la celulosa. La producción de biodiésel es una tecnología de conversión bioquímica que utiliza cultivos de semillas oleaginosas para producir energía (Dincer, 2008b; Demirbas, 2008f; Shieh y col., 2003; Demirbas, 2009f; Sigar y col., 2009; Demirbas, 2008m; Ilkilic y Yucesu, 2008; Sastry y col., 2006; Demirbas, 2008n; Lv P, 2008).

Los materiales de celulosa pueden utilizarse para producir bioetanol. El bioetanol representa un importante combustible renovable líquido para el motor los vehículos. La producción de bioetanol a partir de la biomasa es una forma de reducir tanto el consumo de petróleo crudo y la contaminación del ambiente. Con el fin de producir bioetanol a partir de biomasa celulósica, un proceso de pretratamiento se utiliza para reducir el tamaño de la muestra, rompiendo la hemicelulosa en azúcares, y abrir la estructura del componente de celulosa. La porción de celulosa se hidroliza por ácidos o enzimas en el azúcar como glucosa que es fermentado en bioetanol. Los azúcares de la hemicelulosa son también fermentadas para bioetanol. El uso de bioetanol como combustible de motor tiene una larga historia como el propio vehículo. Se inició con el uso de etanol en el motor de combustión interna (Demirbas, 2005).

Las materias primas de la fermentación requieren un pretratamiento químico, físico o biológico para abrir la estructura de la biomasa y reducir los carbohidratos complejos en azúcares simples. Este conjunto de pretratamientos se conoce a menudo como la hidrólisis. Los azúcares resultantes pueden ser fermentados por la levadura y por las bacterias empleadas en el proceso. Las materias primas de alto contenido de almidón y con azúcares son más fácilmente hidrolizadas. Las materias primas celulósicas, incluyendo la fracción de materia orgánica en los RSU, son más difíciles de hidrolizar, requieren de un pretratamiento más extensivo. La fermentación es generalmente utilizada industrialmente para convertir sustratos como la glucosa, en etanol para su uso en bebidas, combustible, aplicaciones químicas y otros productos químicos (por ejemplo, ácido láctico utilizados en la producción de plásticos renovables) y los productos (por ejemplo, enzimas para detergentes). Estrictamente hablando, la fermentación es un proceso anaerobio enzimáticamente controlado, aunque el término es a veces de manera más flexible aplicado para incluir el procesamiento aeróbico. La Figura 2.9 muestra un diagrama de flujo del proceso de hidrólisis enzimática.

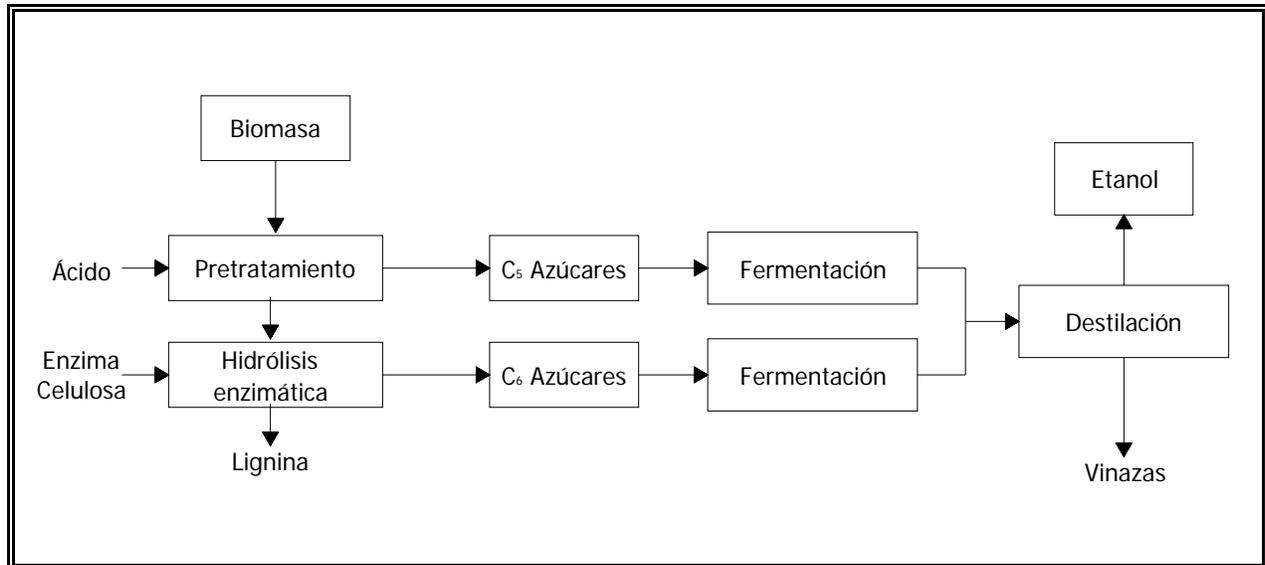


Figura 2.9 Proceso de hidrólisis enzimática (Demirbas, 2009)

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Caracterización de desechos en el hipódromo

En el hipódromo se tienen lugares destinados para depositar los desechos de las caballerizas. En las caballerizas existen lugares consignados para cada uno de los caballos. En los cuales se colocan camas de aserrín y viruta para el bienestar del caballo y para mantener seco el sitio por la orina y excremento del caballo. Pero estas camas se recogen y se depositan en un estercolero para que sea llevado por una empresa recolectora de basura.

Así entonces, los estercoleros están compuestos principalmente por aserrín, seguido por residuo fino, que es lo que pasa por la criba y contiene aserrín y excremento, y por último, en un bajo porcentaje se encuentra la paja. El estiércol del hipódromo se compone como lo muestra la Figura 3.1. En la Figura 3.2 se tiene una foto de la muestra de estiércol obtenida en el hipódromo. En este caso, como el hipódromo se encuentra dentro de la ciudad, los residuos entran en la clasificación como Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y a su vez caen dentro de los residuos orgánicos. Sin embargo, la densidad no es la que comúnmente podrían tener los RSU orgánicos ya que se está hablando de estiércol de caballo.

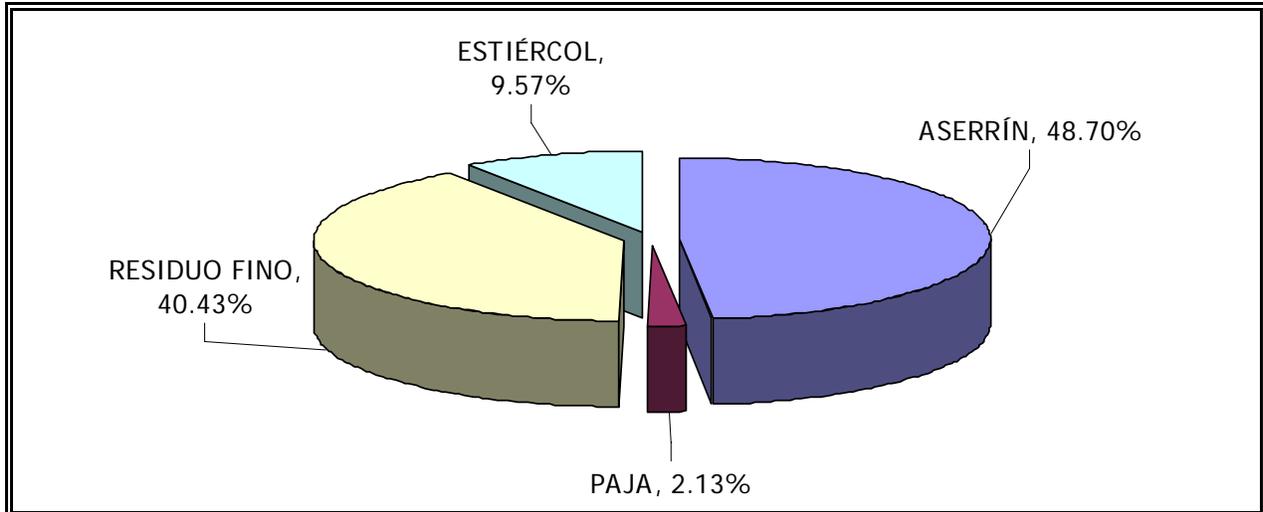


Figura 3.1 Composición de los residuos de los estercoleros en el hipódromo (ASESCOR, 2006)

La densidad del estiércol de caballo del hipódromo es de  $339.5 \text{ kg/m}^3$  (ASESCOR, 2006) y su composición química es la que muestra la Figura 3.3. También como se puede apreciar en la Figura 3.3 el estiércol es rico en oxígeno y carbono.



Figura 3.2 Fotografía del estiércol de caballo del hipódromo

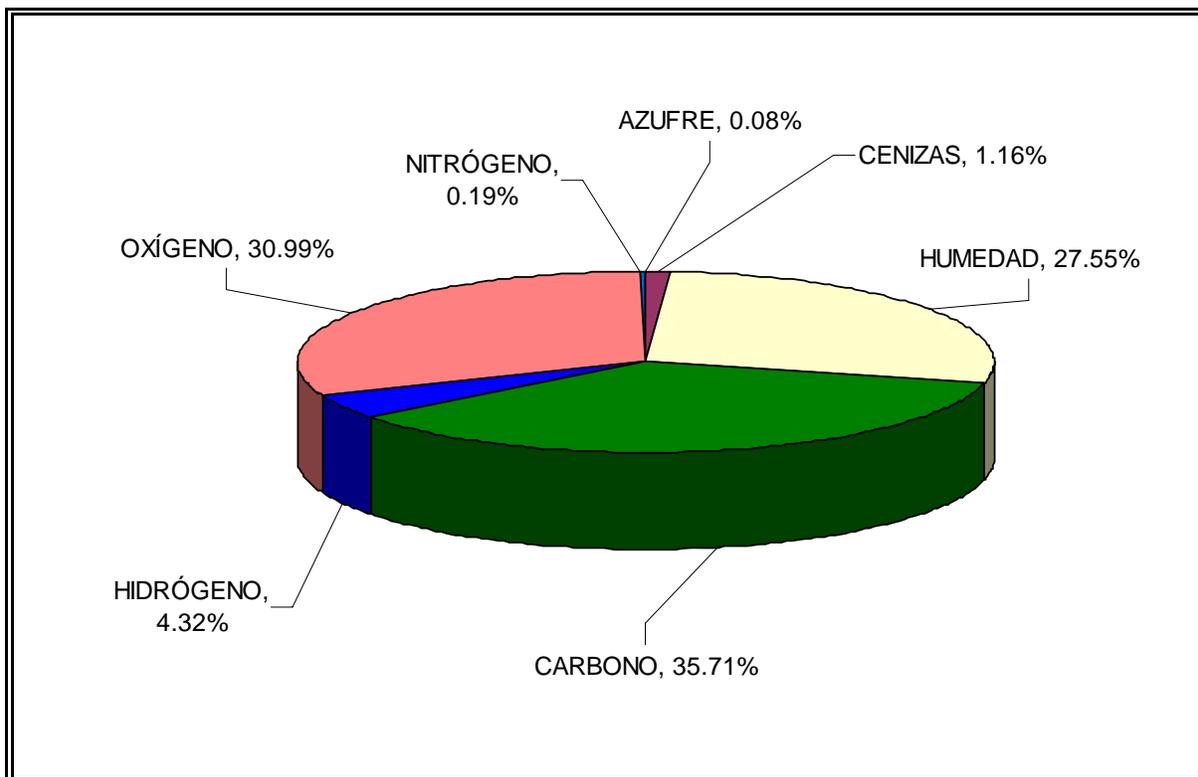


Figura 3.3 Composición química de los estercoleros (ASESECOR, 2006)

### 3.2 PRUEBA ANAEROBIA EXPERIMENTAL

Se diseñó, construyó, arrancó y operó un reactor anaerobio a nivel laboratorio a flujo continuo para realizar la factibilidad técnica de la propuesta. Asimismo, por medio del digestor operando con el estiércol de caballo se obtendrán los parámetros reales de generación de energía térmica y su proyección real a energía eléctrica. Además se pudieron obtener los parámetros reales de diseño para el escalamiento

necesario para el hipódromo. El objetivo de realizar un diseño sencillo del reactor fue el de simular un reactor de muy poco mantenimiento y control de la operación. La adición de mezcladores y controladores de temperatura no simulan la operación real que se puede ejercer en el hipódromo. Es por ello, que se buscó mucha simplificación en el diseño.

El reactor anaerobio a flujo continuo consistió en un sistema en el cual tiene lugar la reacción bioquímica al interior alimentándolo en forma continua del influente (estiércol). La reacción de descomposición se llevó a cabo de manera anaerobia, es decir, sin la presencia de oxígeno.

El reactor se construyó a partir de un recipiente de plástico (polipropileno) delgado, blanco opaco con un volumen total de 4 litros y un volumen útil o de operación de 3 litros. El reactor cuenta con una tapa con rosca de plástico, pero éste plástico es más rígido que el cuerpo del reactor. Ésta tapa con rosca fue necesaria para tener acceso al interior en caso de emergencia o taponamiento.

En la parte superior se colocó una llave de regulación de flujo para el biogás y en la parte del cuerpo del reactor se le instaló una llave para toma de muestras, que al mismo tiempo fue el conducto para efluente del reactor. La temperatura fue monitoreada con un termómetro de laboratorio. Para el sellado hermético del sistema se utilizó silicón para vidrio y aluminio. Para la conducción del biogás se utilizó una manguera de látex de diámetro interno de 7 mm y externo de 11 mm. El reactor tiene una altura de 0.26m y un diámetro de 0.16m. Un esquema del reactor se muestra en la Figura 3.4. Se realizaron pruebas de volumen y fugas después de haber construido el reactor.

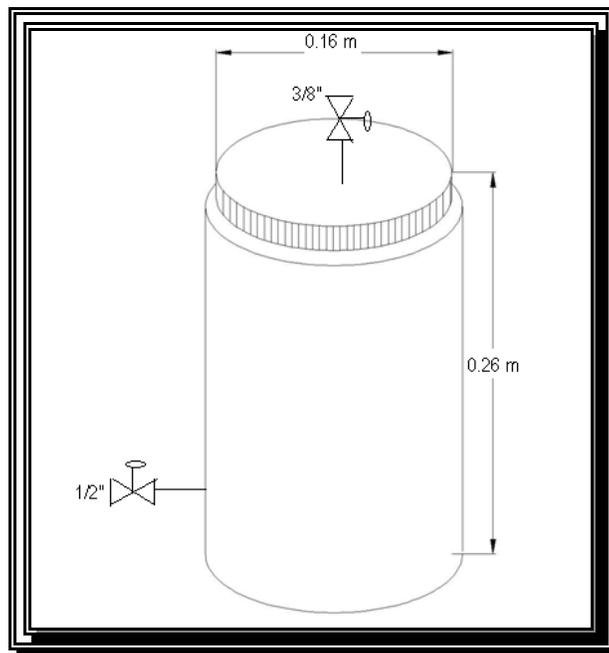


Figura 3.4 Esquema del reactor anaerobio a nivel laboratorio

Una recomendación para tener mejores resultados con el desarrollo del experimento es cubrir el reactor con un material aislante, espuma, cartón, tela, etc. para mantenerlo en una temperatura alrededor de los 25°C. Sin embargo, para este caso se trabajó sin aislamiento ya que el reactor se encontraba en un lugar cerrado. En la Figura 3.5 y 3.6 se muestran fotografías del reactor anaerobio a nivel laboratorio construido para la fase experimental del trabajo.



Figura 3.5 Fotografía del reactor anaerobio a escala laboratorio (vista lateral)



Figura 3.6 Fotografía del reactor anaerobio a escala laboratorio (vista frontal)

### 3.3 ESTIÉRCOL PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL

Se realizaron varias pruebas para la caracterización de los estercoleros. De 7 muestras realizadas se tomó una muestra representativa de cada una de ellas y se mezclaron para tener una muestra general. El volumen de la muestra general fueron 40 litros divididos en dos volúmenes. La muestra general fue almacenada a 4°C para inhibir la degradación microbiana y por ende la degradación bioquímica. De esta muestra se fueron tomando a su vez, muestras para la etapa de arranque del reactor y alimentarlo en su etapa de operación.

### 3.4 PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y FÍSICO-QUÍMICOS MONITOREADOS EN LA ETAPA EXPERIMENTAL DEL REACTOR ANAEROBIO

Para el arranque y operación del reactor se deben monitorear parámetros hidráulicos y físico-químicos para alcanzar el equilibrio del sistema y/o conocer en cierto momento su desequilibrio, actuando y manipulando el sistema para regresarlo al equilibrio.

Los parámetros involucrados son los siguientes y se presentan en la Tabla 3.1:

- pH en influente, efluente y licor mezclado
- Volumen de biogás generado y acumulado
- Tiempo de residencia hidráulico (TRH)
- Agitación
- Temperatura
- Sólidos totales
- Sólidos totales fijos
- Sólidos totales volátiles

Tabla 3.1 Parámetros monitoreados y equipo empleado durante la prueba anaerobia		
Parámetro	Frecuencia	Equipo
pH	5 veces por semana	pH metro digital
Cantidad de biogás desprendida (mL)	5 veces por semana	Probetas graduadas de 500mL por desplazamiento de agua
Agitación	5 veces por semana	Manual
Sólidos totales	1 a 2 veces por semana	Estufa a 105°C por 1h
Sólidos fijos	1 a 2 veces por semana	Mufla a 550°C por 1h
Sólidos volátiles	1 a 2 veces por semana	Mufla a 550°C por 1h
Cuantificación de CH <sub>4</sub> en biogás	Durante varios días del experimento	Prueba de flama

### pH

Este parámetro es muy importante mantenerlo dentro de un nivel 7 o cercano a él, ya que si se acidifica o alcaliniza la mezcla, la reacción de descomposición puede detenerse y ya no se obtendría más biogás. Hay varias formas de medir este parámetro, durante el experimento se recurrió a una cinta tornasol que cambia de color dependiendo del pH del contenido en la mezcla.

### TRH

El TRH representa el tiempo que el sustrato introducido deberá de permanecer en el reactor. El cálculo del mismo usualmente se representa con  $\theta$ , y es igual al volumen del reactor (volumen útil) entre el volumen de alimentación (ecuación 3.1):

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

$V$ = volumen del reactor ( $m^3$ )

$Q$ = gasto ( $m^3/día$ )

$\theta$ =TRH= (días)

Despejando  $Q$  de la ecuación 3.1 se procede a calcular el flujo experimental para el reactor de laboratorio es de:

$$Q = \frac{3000mL}{11} = 272.72mL$$

Para mantener un proceso estable, se debe de escoger un tiempo de retención que impida a través de la salida de sustrato digerido, el arrastre también de bacterias del proceso. Así mismo se debe de tomar en cuenta que con tiempos de retención muy pequeños, sólo se digerirá una parte del sustrato y las producciones de gas no serán muy abundantes.

### Volumen del biogás

El volumen del biogás es necesario monitorearlo para conocer el volumen de generación por unidad de desecho en el sistema anaerobio en equilibrio. Asimismo, conocer el tiempo requerido de estabilización del sistema anaerobio, es decir el TRH. Si el volumen de biogás comienza a disminuir significa que la cantidad de materia orgánica que tienen las bacterias para degradar empieza a ser insuficiente. Por lo tanto, cuando comienza a bajar la producción de biogás desde la primera vez que se arranca el reactor se tendrá el TRH y por otra parte habrá que iniciar las recargas al reactor con la cantidad obtenida a partir del TRH.

El volumen del biogás generado se midió colocando una probeta de un litro llena de agua de cabeza dentro de una tina, ésto para evitar que se saliera el agua de dicha probeta. Después se conectó la maguera de caucho a la salida del reactor y la otra punta se introdujo en la probeta hasta llegar al lugar donde queda un espacio ocupado por el aire.

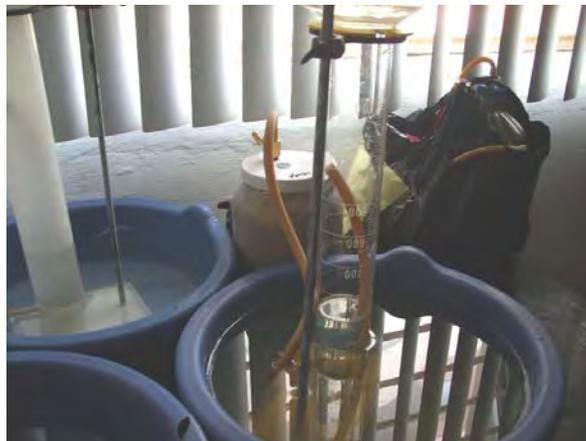


Figura 3.7 Medición del volumen del biogás por desplazamiento de agua

Este sistema de medición se denomina: "Desplazamiento de agua". En la Figura 3.7 se muestra el sistema de desplazamiento de agua, donde puede observarse que el agua fue desplazada por el biogás y el agua ocupa entonces, la parte inferior de la probeta.

Una vez que comenzaba a generarse el biogás este desplazaba el agua hacia la tina; previamente se tomaba el dato del lugar que tenía el nivel del agua en la graduación del probeta. El volumen obtenido era la diferencia entre el valor final del nivel del agua y el inicial.

## Temperatura

La temperatura es otro parámetro que ayuda a saber si el reactor se encuentra en las condiciones deseadas de trabajo. La temperatura no fue controlada porque el estudio fue realizado a temperatura ambiente para evitar los gastos económicos en el control térmico. Lo cual, hace que el sistema sea más amigable con el ambiente y de más fácil manejo. Así que la temperatura solo fue monitoreada. Cambios muy drásticos en la temperatura podría causar desequilibrio microbiano en el sistema y cesar la producción de biogás y por consiguiente la degradación de materia orgánica.

## Sólidos totales, fijos y volátiles

Para la caracterización del estiércol se determinaron los sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV), los resultados se muestran en la Tabla 3.2. Estos parámetros fueron medidos de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 y de acuerdo pruebas basadas en el APHA de 1992. Los sólidos volátiles miden indirectamente la materia orgánica y los sólidos fijo miden indirectamente la materia inorgánica. Asimismo, los sólidos totales son la suma de las dos tipos de materia.

Tabla 3.2 Resultados de la caracterización de los desechos

Muestra	pH	ST (g/L)	STF (g/L)	STV (g/L)
Estiércol	7	78.12342	46.86399	31.25942

## Porcentaje de remoción

Con los resultados obtenidos del análisis químico del lodo digerido y de la muestra de estiércol, determino el porcentaje de remoción. El porcentaje de remoción indica un aproximación del porcentaje de materia que fue transformada en los productos de al digestión. La ecuación 3.2 indica como se calcula este porcentaje de remoción.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{ST(\text{INFLUENTES}) - ST(\text{EFLUENTES})}{ST(\text{INFLUENTES})} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3.2}$$

La Tabla 3.3 muestra los datos obtenidos del análisis químico de la muestra de estiércol y del lodo digerido.

Tabla 3.3 Influyente y efluente de la mezcla

Muestra	Influente (g/L)	Efluente (g/L)
Estiércol	33.9	51.2

$$\% \text{ Remoción} = \frac{33.90 - 51.20}{33.90} \cdot 100 = 51\%$$

### 3.5 Arranque del digestor

Antes de introducir el estiércol al digestor se buscó tener un mezcla lo más homogénea posible, esto porque aunque todo venía junto en la mezcla, no venía mezclado ni homogéneo al 100%.

El digestor experimental tiene 4 litros de volumen total y 3 litros de volumen útil. Es decir, 1 litro de volumen de almacenamiento para biogás. De los 3 litros de volumen útil, 70% fue estiércol y 30% de agua. Esta relación puede variar un poco, no es estrictamente en esa proporción, lo ideal es tener una mezcla pulposa, ni muy seca ni muy acuosa. La consistencia debiera ser cercana al 20% de sólidos totales.

En este trabajo, al inicio de la puesta en marcha del digestor se agregó 1 litro de inóculo, la cual permite acelerar el proceso de descomposición del estiércol. El inóculo es un concentrado de bacterias de otro reactor anaerobio ya en operación. El inóculo fue una donación de una cervecería donde tratan sus aguas residuales por medio de sistemas anaerobios que han operados las últimas dos décadas. Por lo tanto, se habla de un inóculo en equilibrio, concentrado y metanogénico. Ésto permite que no se tenga que esperar a que a partir del estiércol se alcance la población metanogénica, que podría generarse en los próximos 4 meses de arranque. Lo cual, retrasa los resultados que pudieran obtenerse casi de inmediato al considerar en el sistema agregar un inóculo. En resumen en la Tabla 3.4 se muestra la mezcla de arranque que llevo a cabo para la experimentación.

Tabla 3.4 Porcentaje de sustancias al arranque del digestor

Sustrato	Volumen [L]	Porcentaje %
Estiércol	1.4	46.6
Agua	0.6	20.0
Inóculo	1.0	33.4

En la Figura 3.8 se muestra el reactor anaerobio con la carga inicial de arranque. Las marcas indican los 3 sustratos agregados que se mencionaron en la Tabla 3.4



Figura 3.8 Fotografía del digestor con la carga inicial del arranque

Una vez listo, se comenzó a monitorear los parámetros mencionados de monitoreo. Las pruebas de flama se realizaron de acuerdo a la una flama sostenible y su coloración. Si se lograba una flama de 3 segundos de color azul, lo cual indica que hay una proporción de gas metano alrededor del 60%.

En lo que respecta al pH, el estiércol siempre se mantuvo en valores entre 6 y 7 de pH, por lo cual no resultó muy difícil mantenerlo estable.

### 3.6 Desarrollo de la metodología para evaluación económica

La metodología que se eligió para determinar la factibilidad económica del proyecto es el cálculo del valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR).

#### Valor Presente Neto (VPN)

El VPN indica el valor “al día de hoy” del flujo del efectivo generado por el proyecto en el horizonte de evaluación y puede definirse como el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos de efectivo descontados a la inversión inicial. Suma los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todos los desembolsos necesarios para producir dichas ganancias, en términos de su valor equivalentes en este momento o tiempo cero (Reyes, 2010).

Para calcular el VPN se utiliza una tasa de descuento ( $r$ ), el cual se refleja el costo de oportunidad de los recursos. La expresión matemática para calcular el VPN es la siguiente:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1+r)^t} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

$FE_t$ : Representa el flujo de efectivo en cada periodo de tiempo "t"

La tasa de descuento o costo de oportunidad del dinero está representada por "r"

n: Es la vida útil de la inversión medida en años

$\Sigma$ : es la sumatoria del valor presente neto de los flujos de efectivo descontados

$I_0$ : es la inversión inicial

La regla de decisión de este indicador consiste en que si el VPN es positivo, entonces el proyecto es rentable, y que invertir en el proyecto generará más riqueza al momento de ser ejecutado, por el contrario si el VPN es negativo indica que se tendrán pérdidas en caso de llevarlo a cabo y por lo tanto, la realización del proyecto no es conveniente.

### Tasa Interna de Retorno (TIR)

Indica la rentabilidad de realizar un proyecto y a su vez es la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero. Su expresión matemática es la siguiente:

$$VPN = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{FE_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$TIR = \frac{-I_0 + \sum_{i=1}^n FE_i}{\sum_{i=1}^n i \cdot FE_i}; \quad I_0: \text{ inversión inicial} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

La regla de decisión para este indicador es aceptar los proyectos cuya TIR sea igual o mayor a la tasa de descuento (10%) en este caso. La TIR solo es útil, cuando los proyectos se comportan normalmente, es

decir cuando los primeros flujos de efectivo son negativos y los siguientes son positivos; lo anterior se debe a que si cambia el signo más de una vez de los flujos netos del proyecto, se pueden obtener diferentes valores de TIR. Por último, es importante mencionar que la TIR, por ser una tasa, no se puede utilizar como criterio de comparación entre proyectos y debe ser siempre acompañada por el VPN.

## **CAPÍTULO 4**

### **ESTUDIO DEL CASO**

#### **4.1 El Hipódromo**

La historia del nacimiento del hipódromo comienza con el italiano Bruno Pagliai quien se ilusionó con la idea de construir un hipódromo en la creciente ciudad de Las Vegas. Desde 1901, el hipódromo tenía en operación el primer casino, el Golden Gate. Pagliai pensó que un hipódromo sería el complemento perfecto para la "ciudad del juego", pero encontró una negativa que lo llevó a California, donde tampoco tuvo éxito. Hablamos del año de 1941. Entonces se enteró que en México solo operaba un hipódromo en Tijuana y albergó la esperanza de convencer al gobierno de su construcción. De alguna forma se las ingenió para conseguirlo.

Cuando gobernaba en la presidencia el General Manuel Ávila Camacho, luego de hacer algunas averiguaciones y de convencerse de la viabilidad del proyecto, el presidente lo mandó llamar a Pagliai y aprovechando una concesión que había emitido el General Lázaro Cárdenas para operar un hipódromo que no fue construido, el General Ávila Camacho dio la concesión al italiano. El 6 de marzo de 1943, en un terreno propiedad de la Secretaría de la Defensa Nacional de casi 60 hectáreas, se construyó el majestuoso hipódromo de las Américas, con espacio suficiente para la pista, caballerizas, estacionamiento y tribunas. Esa primera concesión fue por 10 años exenta de impuestos.

Durante la segunda guerra mundial, los Estados Unidos luchaban contra Alemania, Italia y Japón. La hipica norteamericana no operaba entonces. No fue difícil traer personal de gran valía para operar el flamante hipódromo en México. Tampoco fue complicada traer a México algunos de los grandes ejemplares norteamericanos, de manera que la historia del Hipódromo inició con el pie derecho. Aquella tarde de 1943, el General Manuel Ávila Camacho, acompañado de Carlos Calderón Guardia, presidente de Costa Rica e inauguraron la hermosa "Loma de Sotelo". La actuación de Pagliai al frente del hipódromo culminó en 1953.

Luego de cerrar de mediados de 1996 a noviembre del 1999, el hipódromo fue concesionado a un corporativo, que opera desde entonces el ahora único hipódromo del país. Aquí corren las razas pura sangre y cuarto de milla en una temporada anual de 11 meses, con carreras de viernes a domingo y con unas 12,000 participaciones al año de los más de 1,300 caballos que viven de forma permanente en las caballerizas.

El hipódromo tuvo una espectacular remodelación previa a su reapertura de 1999. Cuenta con una cómoda grada en 3 niveles, palcos y variadas opciones de restaurantes, que incluyen el 1943 de comida mexicana, el Turf Club con especialidades en mariscos y pastas, así como el extenso buffet de la Terraza o la privacidad para los socios del Jockey Club Mexicano.



Figura 4.1 Vista del hipódromo, gradas y parte de la pista

## 4.2 Generación de residuos en el caso del estudio

El hipódromo siendo un centro de espectáculos y entretenimiento se ve inundado por un mundo de gente cada vez que hay carreras de caballos, conciertos, etc. Ésto trae como consecuencia la generación de una gran cantidad de residuos diferentes.

### 4.2.1 Gradadas

La generación de residuos que se calcula para las gradadas del hipódromo es de 1,283.8 kg, con un aforo de 1979 asistentes. Por lo que el resultado obtenido se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Residuos generados en las gradadas del hipódromo (A partir de ASESCOR, 2006)

Parámetro	Total	Unidad
Aforo	0.649	Kg /(asistente × evento)

En la Figura 4.2 se muestra una caracterización física de los RSU provenientes de las gradadas del hipódromo. Se observa que los residuos contienen residuos alimenticios, seguidos por papel, posteriormente plásticos y otros residuos. La composición química de los residuos de las gradadas se muestra en la Figura 4.3

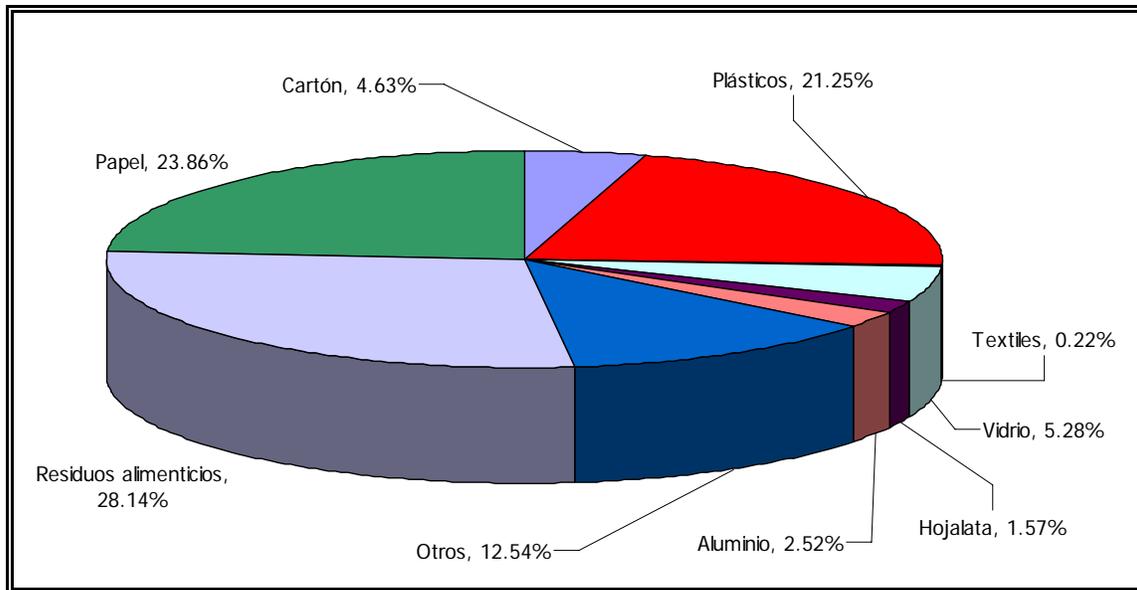


Figura 4.2 Composición de RSU de las gradas del hipódromo (ASESCOR, 2006)

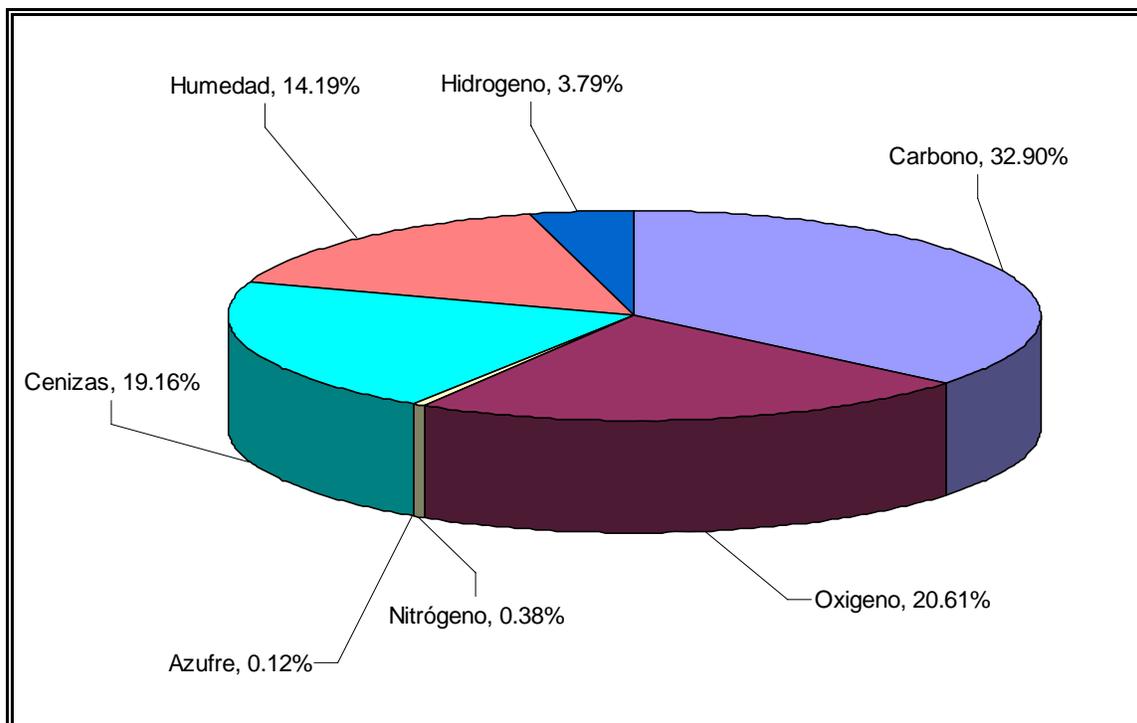


Figura 4.3 Composición química de los RSU de la gradas del hipódromo (ASESCOR, 2006)

#### 4.2.2 Granja del hipódromo

El hipódromo cuenta con una granja donde hay animales pequeños como borregos, gallinas, conejos, chivos, etc. Este lugar ofrece principalmente su servicio a los niños. Se tomó una muestra proveniente de

la granja 101.4 kg con un aforo de 526 personas. Con estos datos se calculó la generación por asistente, cuyo resultado se exhibe en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Residuos generados en granja del hipódromo (A partir de ASESCOR, 2006)

Parámetro	Total	Unidad
Aforo	0.193	Kg/asistente × día

Dentro de los datos presentados, se muestra una tendencia significativa en la generación de los residuos cuyos cálculos se realizaron utilizando como parámetro los aforos. Los parámetros en los que se utilizaron el número de trabajadores y la superficie, los datos varían considerablemente, por lo que no se puede presentar un promedio de los datos.

Los residuos provenientes de granja del hipódromo están compuestos por plásticos (bolsas de LDPE, recipientes de unisel, envases de refresco (PET), entre otros), papel (higiénico, periódicos y revistas, y otros papeles) y residuos alimenticios, principalmente de comida rápida; entre otros residuos. En la Figura 4.4 se muestra el porcentaje en que se encuentra los residuos. La composición química de los residuos de la granja se muestra en la Figura 4.5.

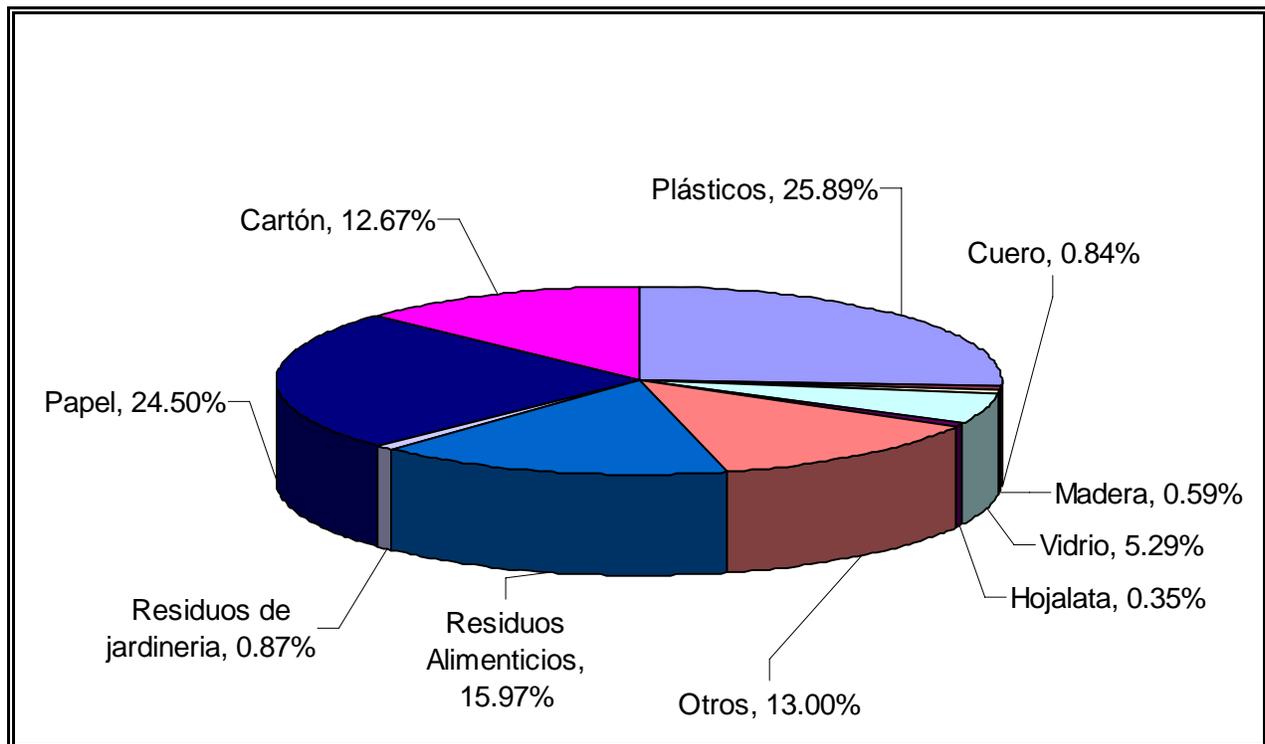


Figura 4.4 Composición física de los desechos de la granja del hipódromo (ASESCOR, 2006)

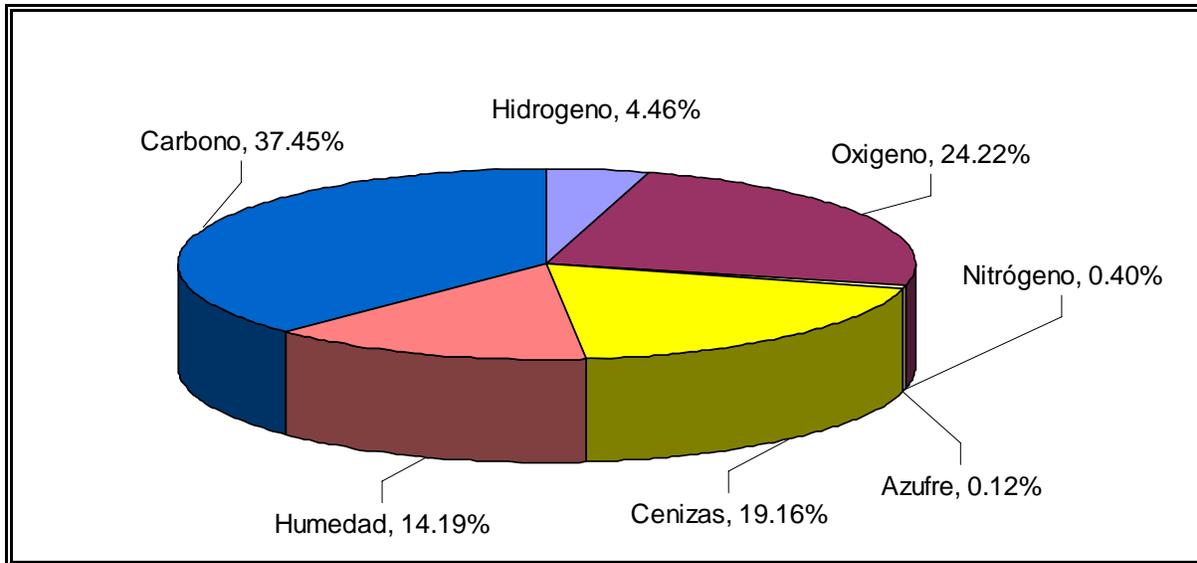


Figura 4.5 Composición química de los residuos de la granja del hipódromo (ASESCOR, 2006)

#### 4.2.3 Restaurantes y cafeterías

Como se mencionó al inicio del capítulo, el hipódromo cuenta con zonas de comida o restaurantes los cuales generan también residuos. La Figura 4.6 muestra que el principal subproducto que se encuentra en los RSU de los restaurantes del Hipódromo, son los residuos alimenticios, le siguen el papel, principalmente conformado por bond e higiénico, posteriormente vidrio de envases, seguido por plásticos.

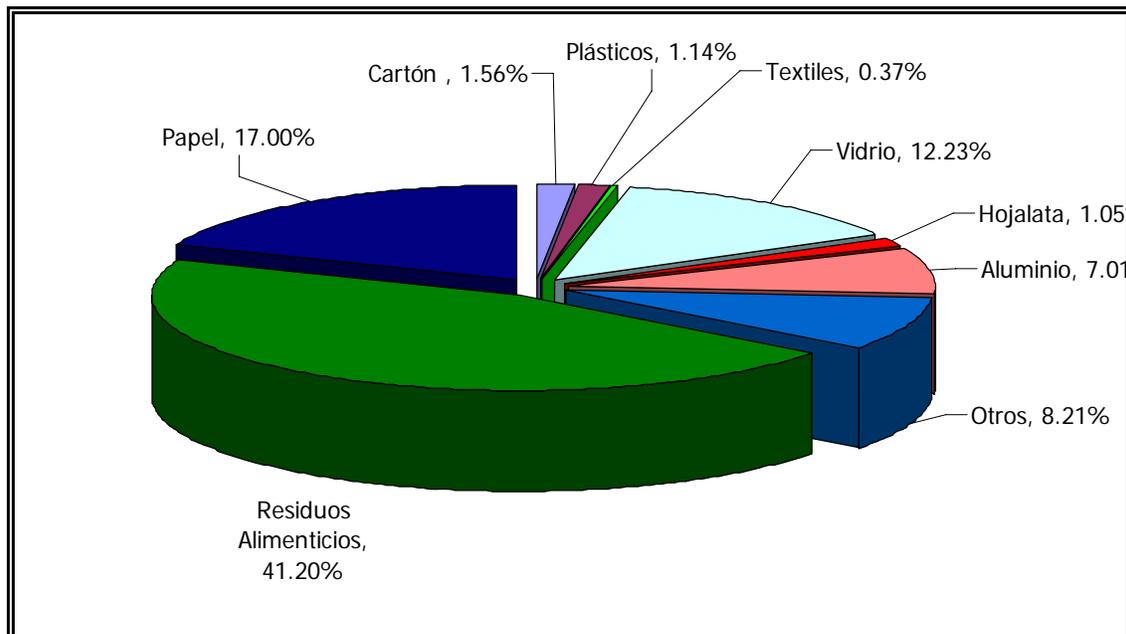


Figura 4.6 Composición física de RSU de los restaurantes del hipódromo (ASESCOR, 2006)

#### 4.2.4 Caballerizas

Los RSU de las caballerizas están compuestos por plásticos, entre los que destacan envases de refresco (PET), bolsas, envases hechos con HDPE, recipientes de unicel (Figura 4.7). El subproducto que sigue es el papel, dentro de los que se encuentran periódicos y revistas, además de otros papeles, como el estraza y el encerado, después de los papeles, los subproductos que se encontraron en mayor cantidad son los residuos alimenticios, posteriormente textiles, que primordialmente eran vendas y, en menos cantidad, residuos biológico-infecciosos. La Figura 4.8 muestra las características químicas de estos desechos.

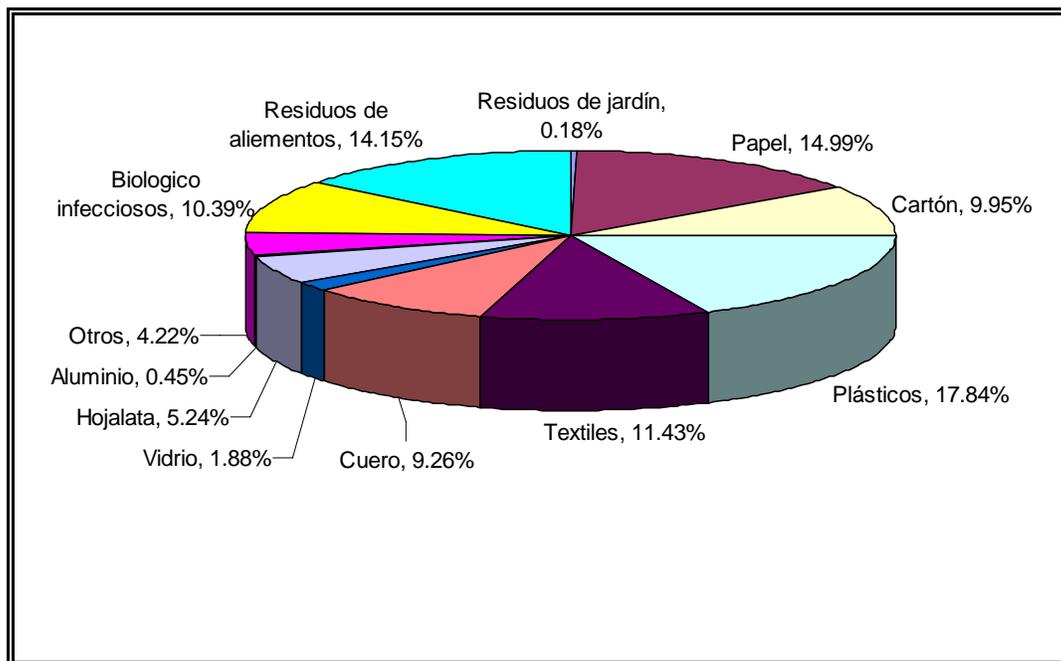


Figura 4.7 Tipos de residuos de las caballerizas en el hipódromo (ASESCOR, 2006)

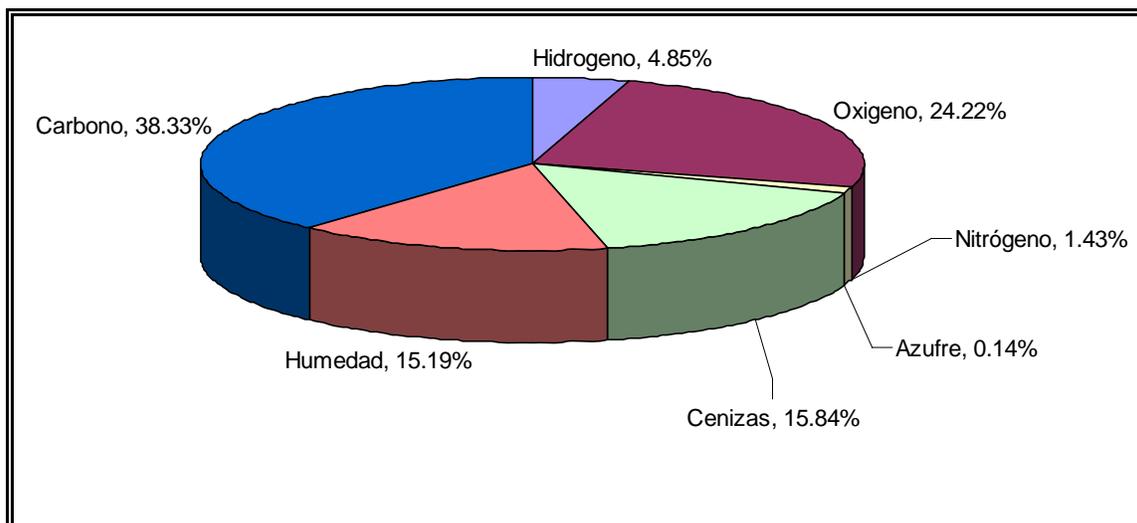


Figura 4.8 Composición química de los residuos de caballerizas (ASESCOR, 2006)

#### 4.2.5 Estadísticas de los residuos generales

En la Figura 4.9 se muestra el peso volumétrico de algunos de los sitios que componen el hipódromo, dentro de los datos, destacan por ser más altos, los que provienen de los restaurantes y el estiércol. El valor del peso volumétrico incrementa, en la medida en que se presenta mayor humedad en los RSU, en el caso de los restaurantes, por la composición de residuos alimenticios y en el segundo caso, por el estiércol.

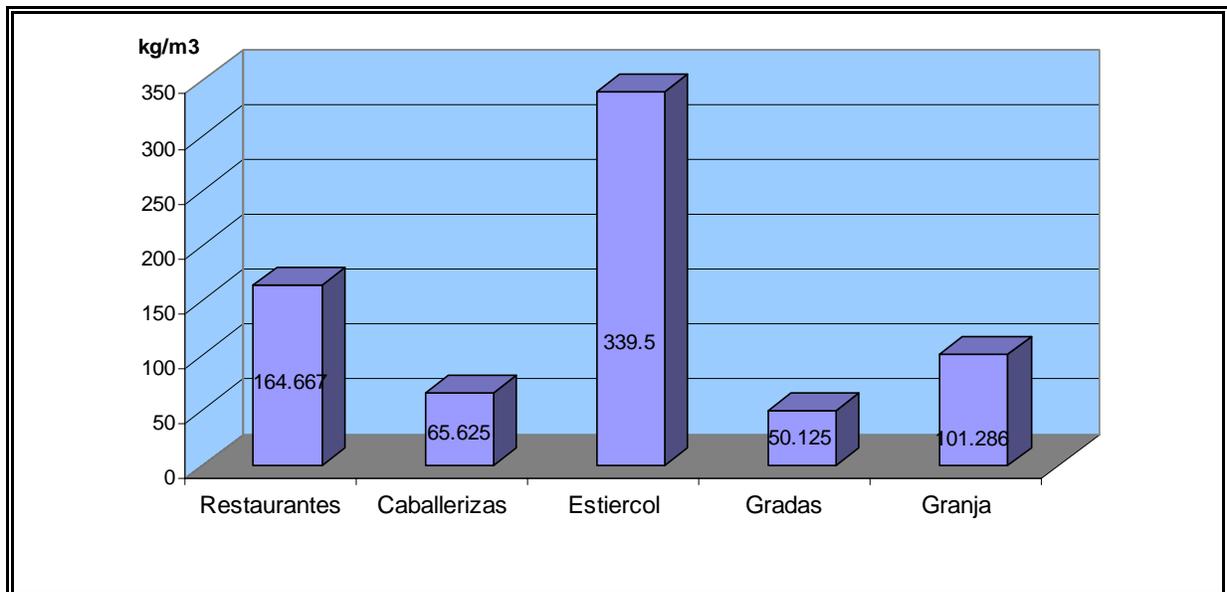


Figura 4.9 Peso volumétrico de los residuos generales del hipódromo (ASESCOR, 2006)

Dentro del hipódromo hay diferentes centros que no pueden promediarse sus valores, debido a que pertenecen a diferentes actividades y la composición de los residuos no es similar, por lo que se presentan los principales parámetros por separado.

Los datos son muy similares a los anteriormente presentados, y, por ejemplo en el caso del carbono, los valores están por debajo de los estimados para los residuos sólidos urbanos domiciliarios, que es de 43.02%. La relación C/N igual que en los casos anteriores no entra en el intervalo óptimo. Y en cuanto al poder calorífico, todos los valores entran dentro del rango óptimo para recuperación energética, siendo mayor en las caballerizas (Figura 4.10). Todo material combustible tiene un poder calorífico, en la Figura 4.11 se presentan los poderes caloríficos de los residuos que se generan en el hipódromo.

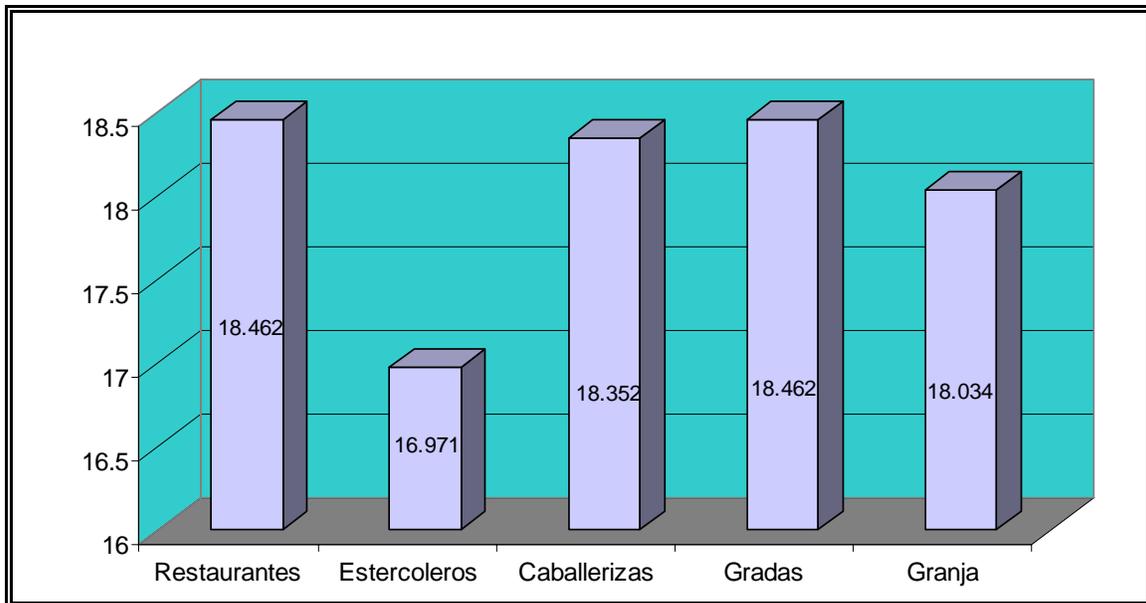


Figura 4.10 Relación carbón/nitrógeno de los residuos del hipódromo (ASESCOR, 2006)

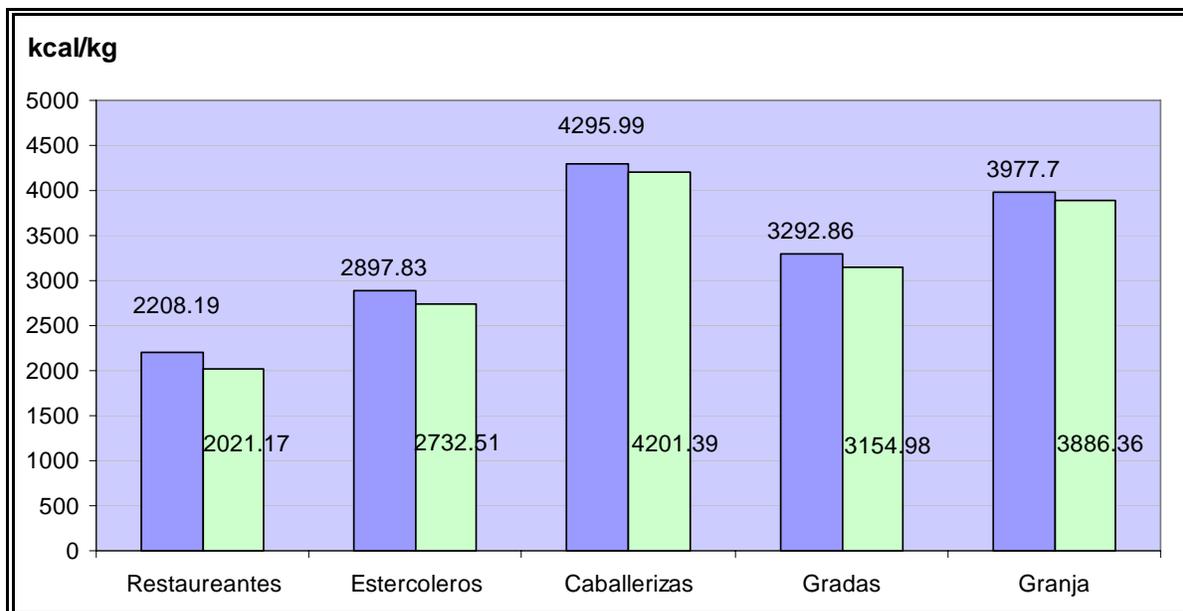


Figura 4.11 Poder calorífico de los residuos generales del hipódromo (ASESCOR, 2006)

### 4.3 Consumo energético

El hipódromo es un complejo muy grande. Cuenta con 2 alimentadores los cuales suministran energía eléctrica en 23,000 Volts a 2 subestaciones que reparten la energía a lo largo del complejo. Cuenta con dos contratos, uno en la tarifa OM y otro en la HM. En la Figura 4.12 se presenta la gráfica del consumo de energía del hipódromo.

La tarifa OM es para una demanda de hasta 100kW y la HM para una demanda de más de 100kW. La tarifa HM se maneja en 3 horarios: Base, intermedio y punta, siendo la primera la tarifa la más económica y la última la más cara. EL horario punta va de 20:00 a 22:00 horas durante el horario de verano y de 18:00 a 22:00 durante el horario de invierno.

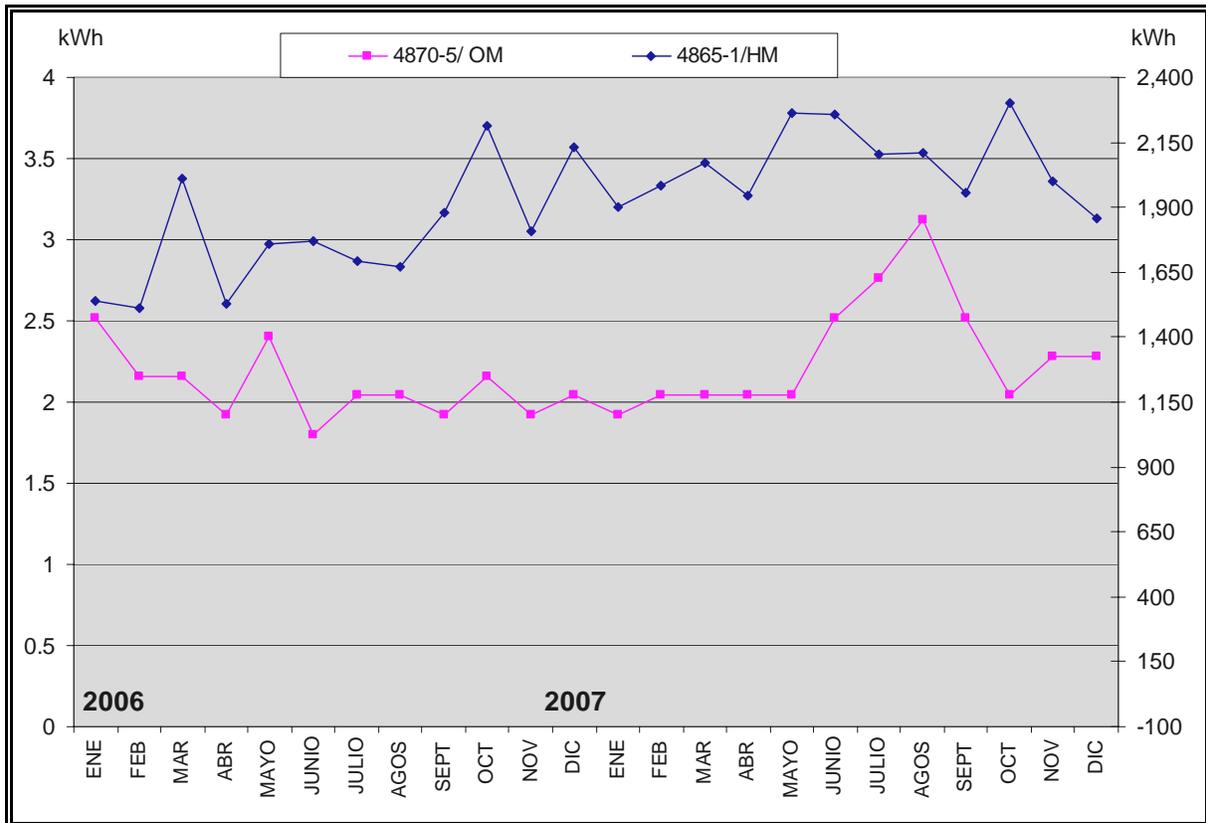


Figura 4.12 Consumo en kWh en 2006 y 2007 en el hipódromo

En este horario es el que se propone cubrir una parte de la carga que demandada por el hipódromo por medio de la energía que se puede obtener del digestor. Una porque es la tarifa más cara y puede sea más costeable y otra porque la cantidad de energía que consume el hipódromo es muy grande. Posiblemente no sea suficiente el sistema propuesto para satisfacer toda la carga por un tiempo muy prolongado. Como se observa en la Figura 4.12, el consumo es mayor en la tarifa HM.

En la Figura 4.13 se observa que la tarifa OM tiene una demanda de 130kW, como se mencionó en el párrafo anterior, la máxima demanda que se permite es de 100kW, por lo tanto tiene un excedente de 30kW y eso se traduce en un sobrecargo sobre el consumo registrado. En el hipódromo hay un área de comida bastante grande por lo cual su consumo de gas es muy representativo (Figura 4.14).

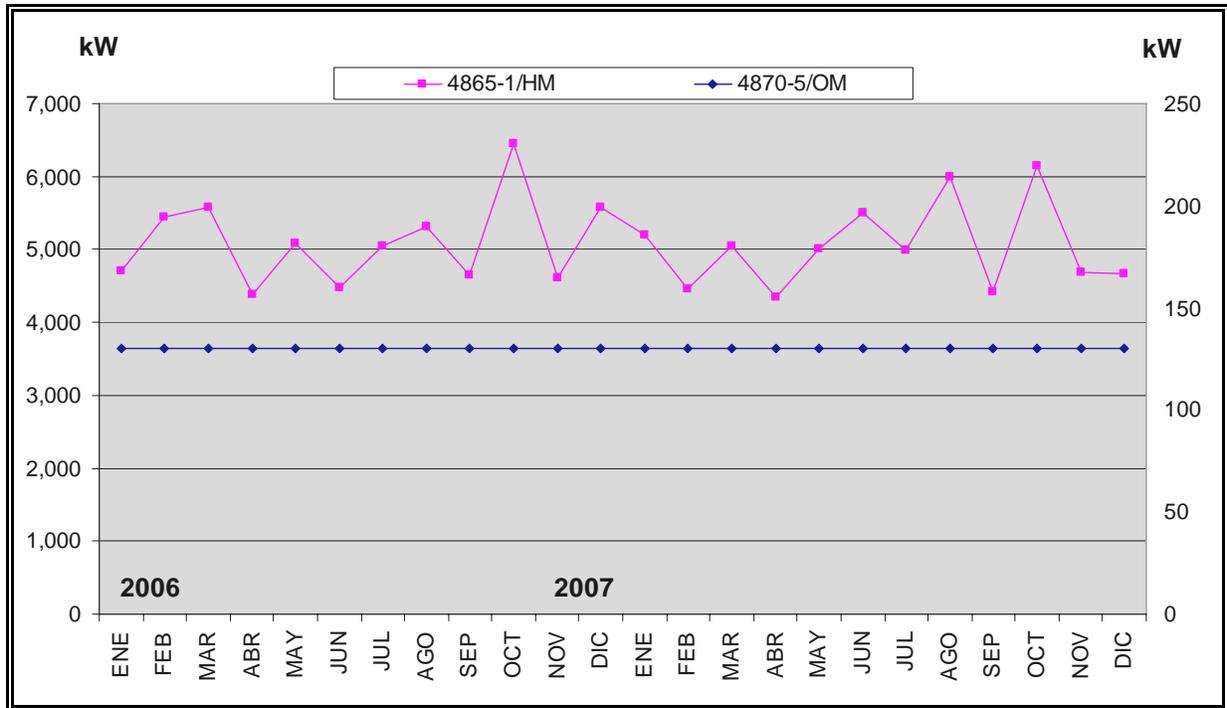


Figura 4.13 Demanda en kW en 2006 y 2007 en el hipódromo

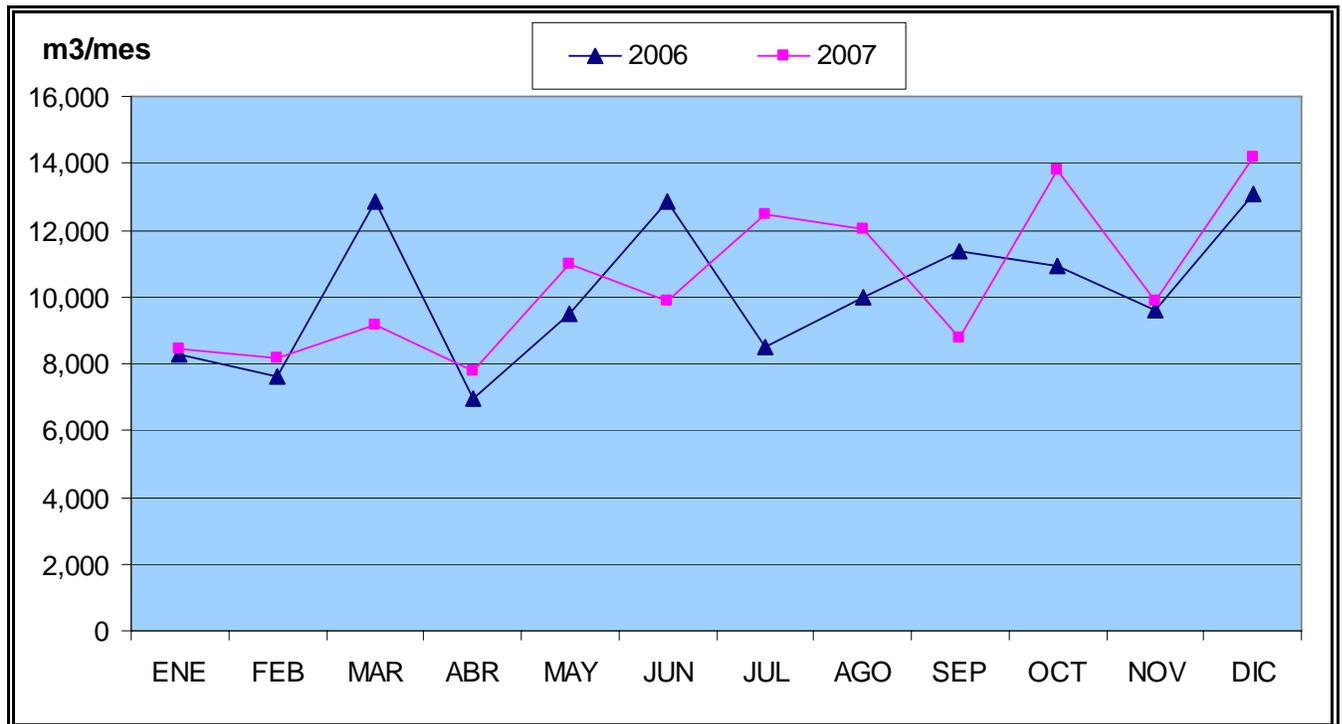


Figura 4.14 Consumo de gas durante el 2006 y 2007 en el Hipódromo

Como se observa en la Figura 4.14, el consumo de gas es semejante para ambos años, de la misma forma pasa con el costo del consumo de gas. En la Figura 4.15 al final, se comienzan a separar, éste se debe a que el gas es un combustible fósil y la tendencia de su precio. Como ya se mencionó en los

primero capítulos de ésta tesis, es incrementar año con año, por cual aunque los consumos se mantengan los precios no lo harán.

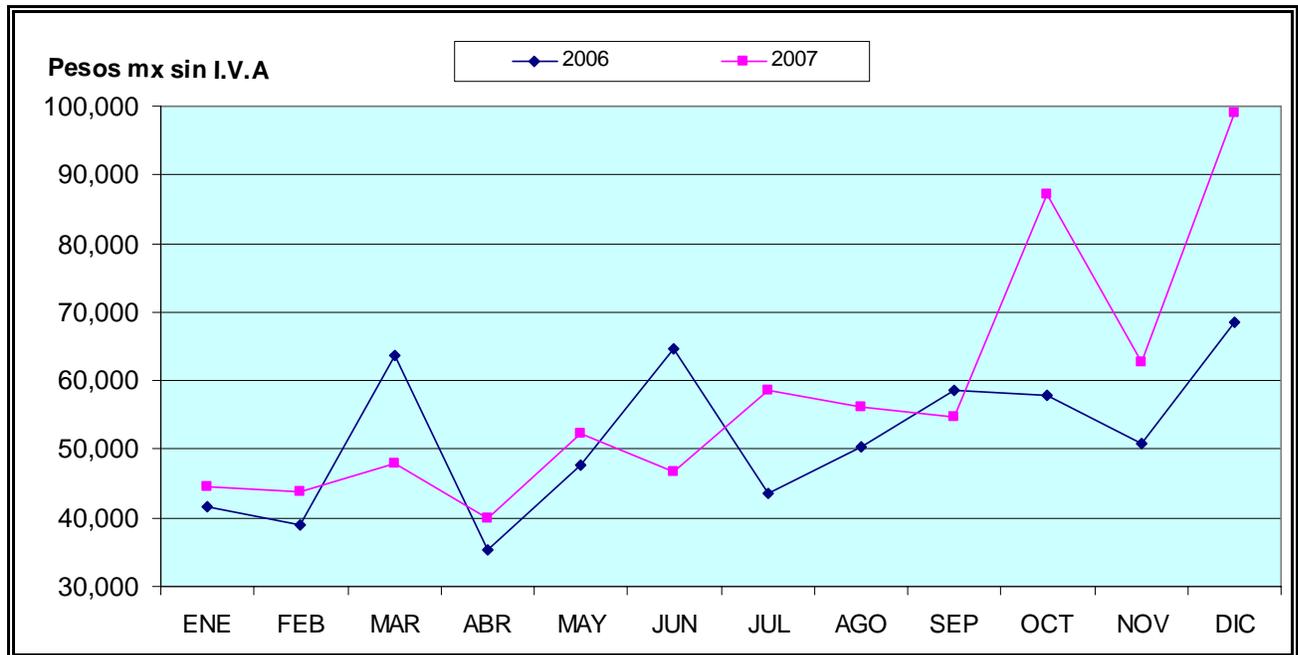


Figura 4.15 Costo del gas durante el 2006 y 2007

Hay otro costo que pasa un poco desapercibido pero es importante mencionarlo ya que es parte de la razón de éste trabajo. El hipódromo paga 7,000.00 pesos diarios para que se lleven el estiércol que se genera en las caballerizas además de los otros residuos que ya se mencionaron al inicio de este capítulo. En la Figura 4.16 y 4.17 se muestra una pala mecánica bobcat subiendo el estiércol al camión que hará la extracción mencionada.



Figura 4.16 Extracción del estiércol



Figura 4.17 Extracción del estiércol de las caballerizas

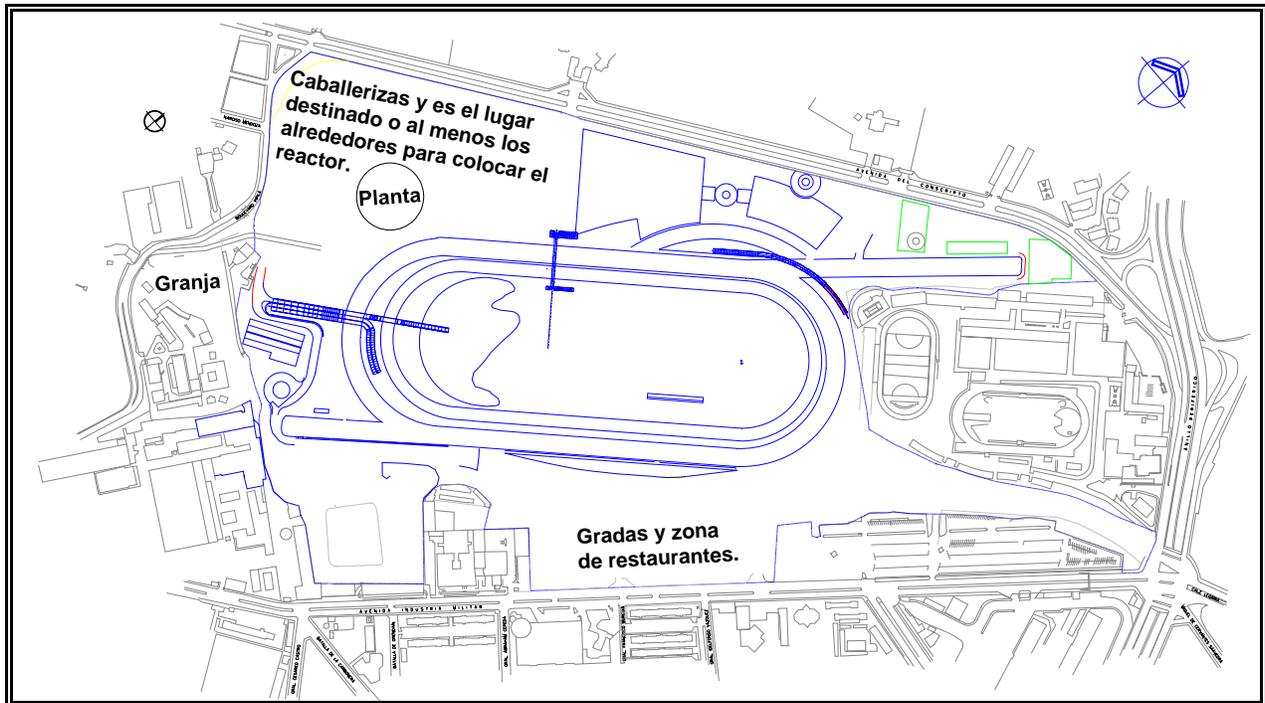


Figura 4.18 Plano del hipódromo, en el se indican los lugares donde se generan los residuos.

En la Figura 4.18 se muestra el plano del hipódromo así como los lugares donde se generan los residuos, que son las gradas, la zona de restaurantes, la granja y las caballerizas. También se muestra la posible ubicación del reactor para generar biogás.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

Se realizaron los trabajos experimentales de un digestor a nivel laboratorio por 9 meses. Durante este tiempo se monitorearon los parámetros mencionados en el capítulo 3. Las figuras que se muestran a continuación son los resultados de generación de biogás tomando en cuenta los distintos parámetros mencionados.

#### 5.1 pH

El pH de la mezcla se mantuvo bastante constante, no hubo que recurrir a la estabilización con hidróxido de calcio. El promedio que se tuvo en el pH fue de 6.2 unidades (Figura 5.1). A partir del día 40, el sistema se comportó estable.

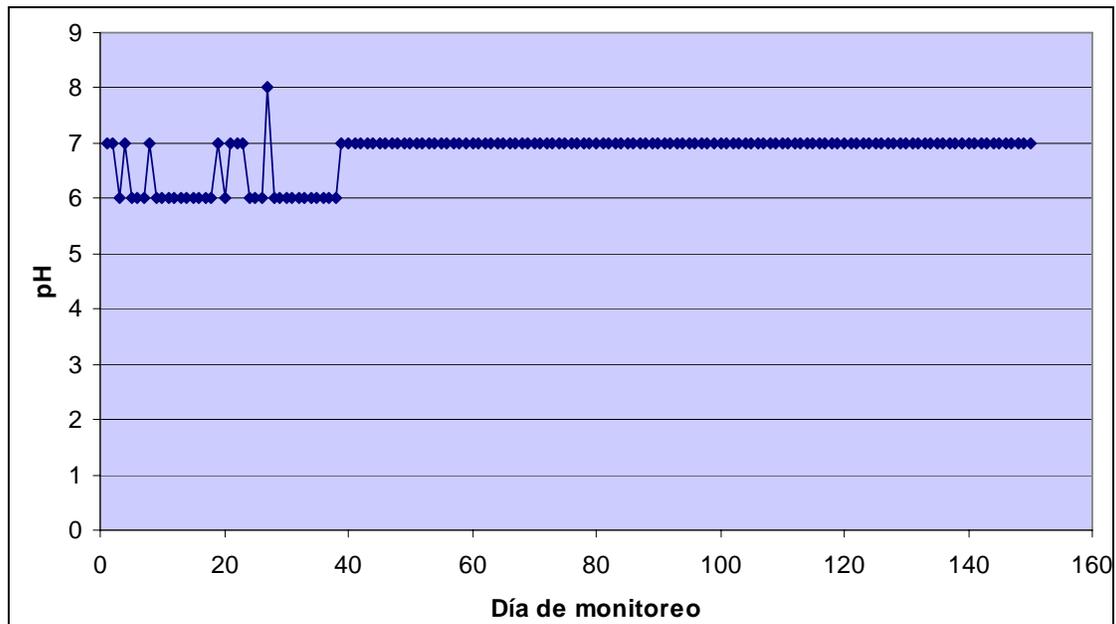


Figura 5.1 Valor del pH durante los días de operación

Como una observación, los días contados no son naturales; el reactor se quedaba en el laboratorio los sábados y domingos, por lo tanto esos días no están contemplados en las mediciones, así como los días festivos y los días donde por error humano no se tomó la lectura.

#### 5.2 TEMPERATURA

La temperatura promedio durante la operación del reactor fue de 20.1°C. Éste valor es aceptable pero ligeramente bajo. Los registros de temperaturas más bajos se dieron a partir del mes de octubre que es

alrededor del día 80 con valores entre 19°C y 18°C. El comportamiento de la temperatura durante el proceso se muestra en la Figura 5.2.



Figura 5.2 Comportamiento de la temperatura durante la operación del reactor

Cuando la temperatura comenzó a descender la producción de biogás bajó, lo cual significa que los cambios de temperatura causa una disminución en la producción de biogás.

### 5.3 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS

Como se mencionó en el capítulo 3, la medición del biogás generado se realizó por desplazamiento de agua. Una vez que se arrancó el digestor se hizo la prueba de flama y al ver que el biogás producido contenía una buena cantidad de metano se procedió a operar en forma semicontinua el digestor. En la Figura 5.3 se muestra la producción diaria de biogás a 45 días de experimentación (arranque) y en la Figura 5.4 se muestra la producción de biogás a lo largo de toda la experimentación.

De la Figura 5.3 se observa que a partir del punto (11, 770) la producción de biogás se comienza a estabilizar y luego decrece, por lo tanto, por lo tanto el TRH experimental es 11 días. Ésto se realiza a condiciones batch para conocer el TRH inicial al cual se debe operar el reactor.

$$\text{TRH}_{\text{exp}} = 11 \text{ días}$$

Haciendo una comparación entre las Figuras de biogás producido (Figuras 5.3 y 5.4) y temperatura (Figura 5.2) a lo largo de la operación del reactor, se observa que alrededor del día 100 en adelante la

temperatura comenzó a bajar y en paralelo la producción de biogás. Por lo tanto es notable que la temperatura influye directamente en la producción de biogás. La producción promedio de biogás en el reactor de laboratorio fue de **596.4 mL biogás/día**. La comparativa de lo mencionado en el párrafo anterior se puede observar en la Figura 5.5.

En la Figura 5.4 se puede observar que se alimentó al reactor en forma discontinua en el día 35. Para ese entonces la producción diaria de biogás ya iba decreciendo.

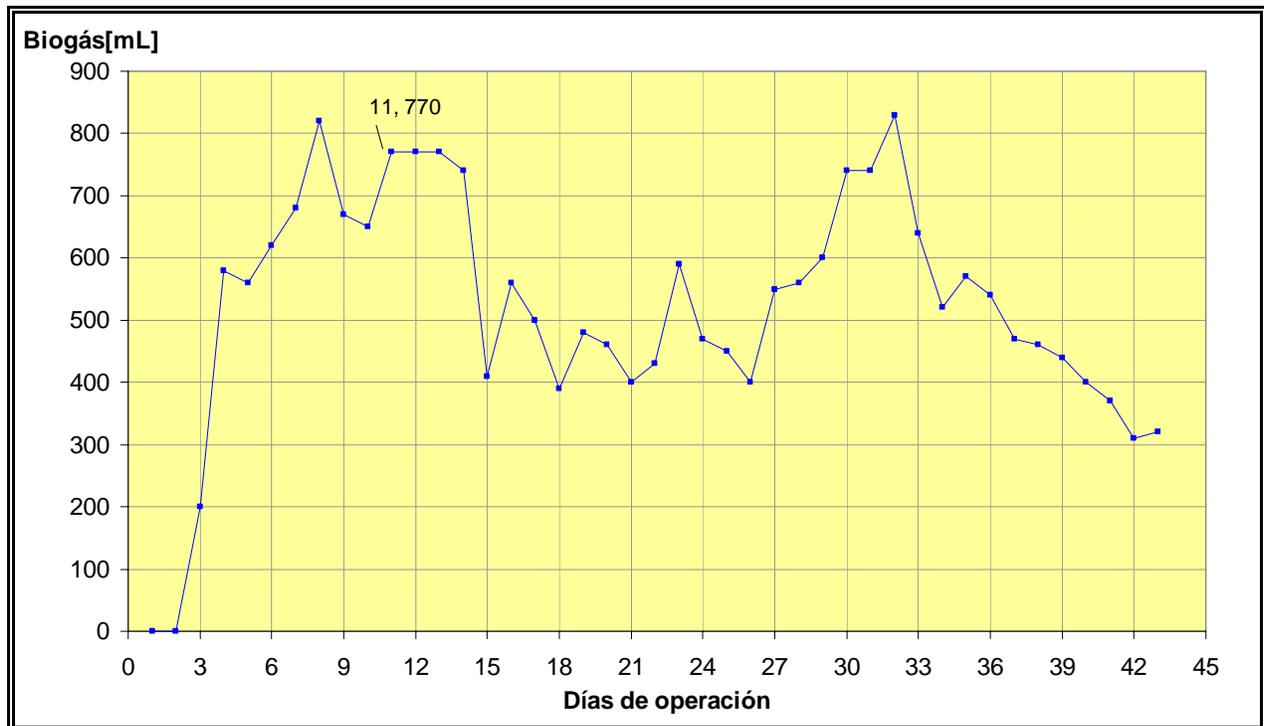


Figura 5.3 Producción de biogás en el reactor anaerobio en los primeros 45 días de operación de arranque

#### 5.4 PRODUCCIÓN ACUMULADA

La producción de biogás mostrada en la gráfica de la Figura 5.4 da un idea de cómo se comportó la producción durante la operación del digestor, sin embargo, la información que muestra es muy simple para tener una idea más clara de dicho comportamiento, pero si hacemos una grafica de producción acumulada podremos ver que tan constante fue al producción de biogás. La grafica de producción acumulada se forma sumando el biogás producido día a día y se hace un reinicio de la gráfica cada vez que hay una recarga en el digestor. En la Figura 5.6 se muestra la producción acumulada del biogás durante la operación así como los tiempos de recarga del digestor.

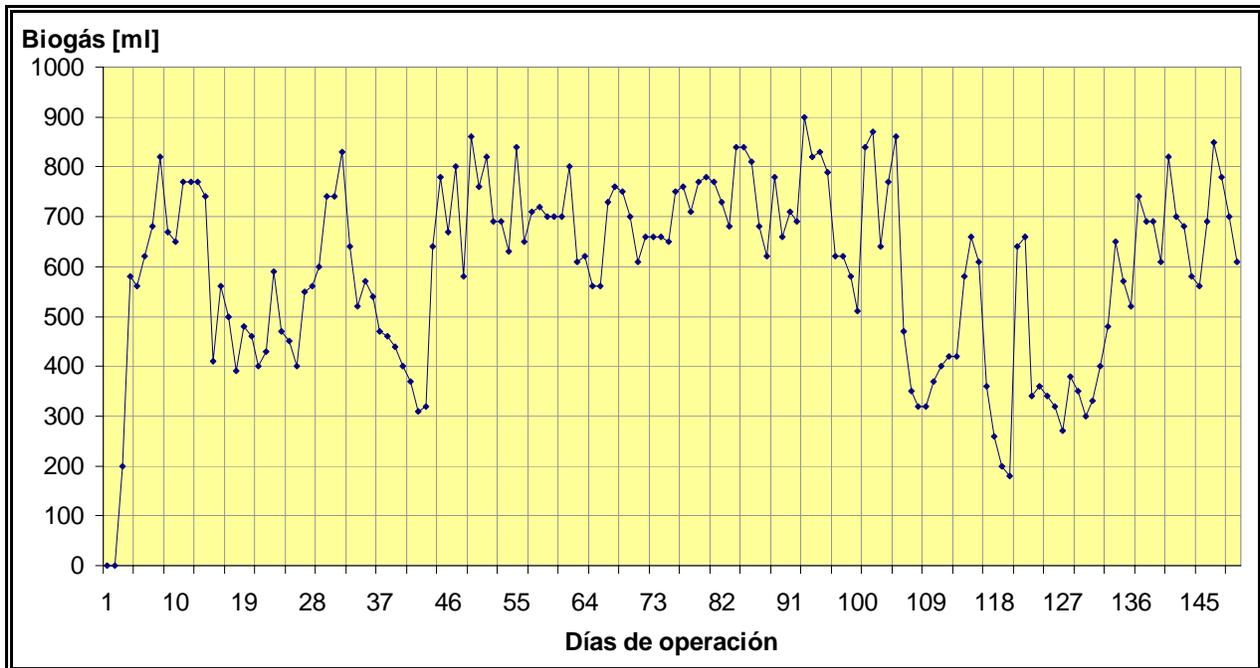


Figura 5.4 Producción de biogás durante todo el proceso de arranque y operación semicontinua del reactor anaerobio

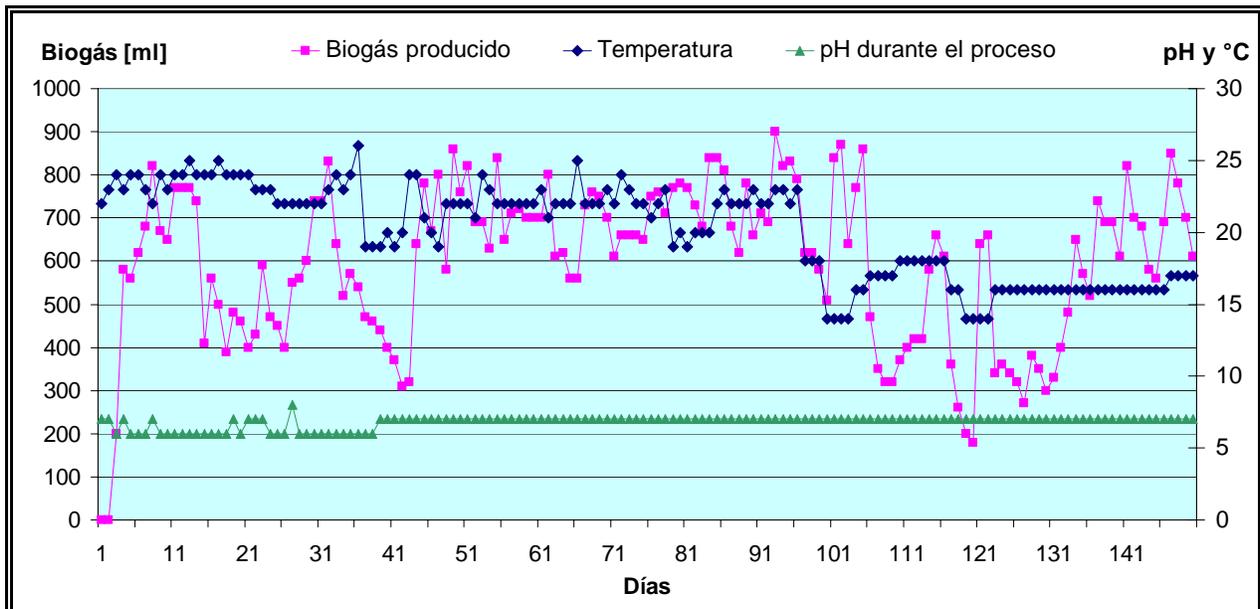


Figura 5.5 Interrelación entre los parámetros de pH y temperatura con la producción de biogás de operación del reactor anaerobio

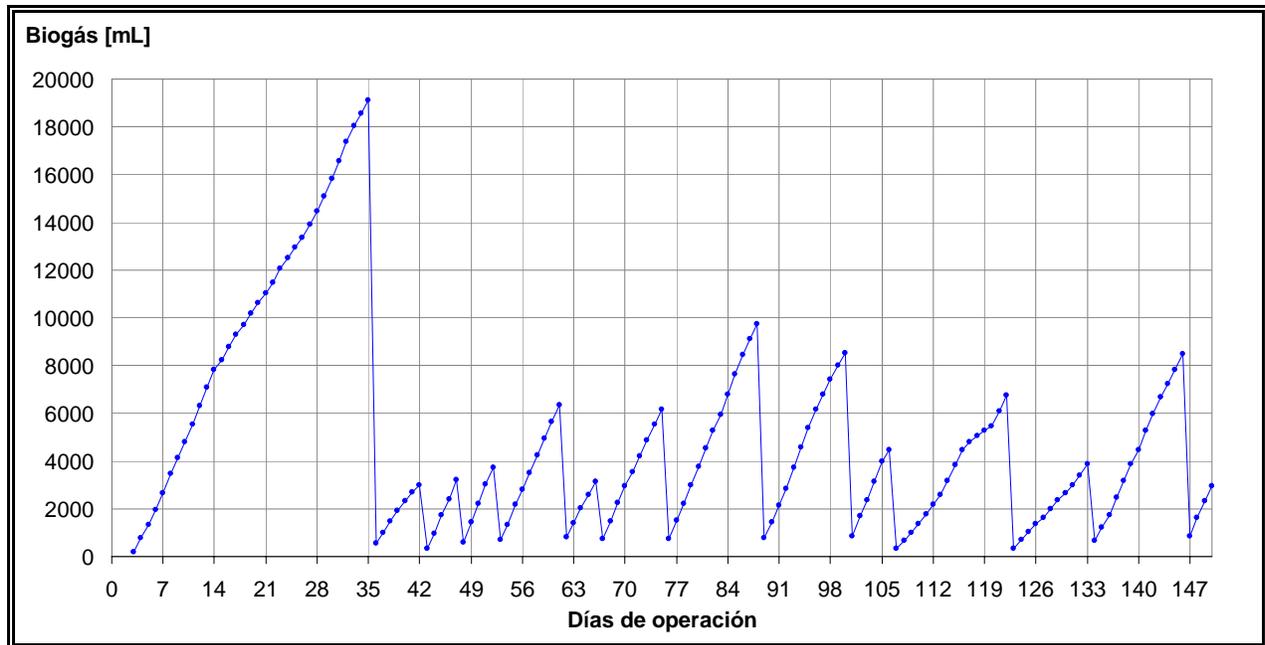


Figura 5.6 Producción de biogás acumulada durante la fase batch y discontinua de operación del reactor anaerobio

## 5.5 ESCALAMIENTO DEL REACTOR ANAEROBIO

En base a los resultados obtenidos experimentalmente se hará la propuesta para el escalamiento del digestor del hipódromo. La cantidad de estiércol generado en el hipódromo anualmente es de **10,185 m<sup>3</sup>/año ó 3,475.8 Ton/año**.

Primero se procede a calcular la capacidad que se requiere en el digestor, es decir, el volumen que el digestor necesita para manejar esta cantidad de materia.

### 5.5.1 Volumen del digestor

$$\text{Volumen del digestor} = [\text{Desecho (m}^3/\text{año)} + \text{co-sustrato(m}^3/\text{año)}] \times \frac{TRH(\text{días})}{365} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Se debe recordar que la materia, en este caso el estiércol, no se introduce solo así en el digestor, requiere de agua para tener una mezcla pulposa y así la degradación anaerobia se lleve a cabo adecuadamente.

Inicialmente se había establecido que 70% debía ser materia ha degradar con 30% de agua, pero el estiércol absorbe mucha agua por su consistencia tan seca, por lo tanto se manejara con 50% de su volumen en agua así se tendrá en **15,185 m<sup>3</sup>/año** de desecho, y para esta caso no se cuenta con otro sustrato o co-sustrato.

Así que, quedaría como sigue sustituyendo en la Ec. 5.1 y tomando un tiempo de residencia de 11 días que fue del resultado experimental de laboratorio:

$$V_{\text{digestor}} = [15,185 \text{ m}^3/\text{año} + 0] \times \frac{11}{365} = 915.26 \text{ m}^3$$

Este valor encontrado será el volumen del digestor en donde se llevará a cabo la degradación anaerobia a condiciones mesofílicas. Para manejar un volumen comercial se propone que el volumen del digestor sea de 1000m<sup>3</sup>.

### 5.5.2 Almacenamiento del lodo digerido

Una vez que se lleva a cabo la degradación en el digestor se debe hacer la recarga, esto es, introducir nueva materia para degradar y sacar una parte de la que se ha degradado. La cantidad de materia que va en la recarga se obtiene de la relación vista en el capítulo 3, donde interviene, flujo, TRH y volumen (Ec. 3.1). La parte que se extrae tiene la ventaja de ser un desecho rico en nutrientes para los jardines o áreas verdes.

Primero el flujo requerido para la recarga será:

$$Q = \frac{V}{TRH} = \frac{915.26 \text{ m}^3}{11 \text{ días}} = 83.2 \text{ m}^3 / \text{día} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

El flujo que se debe tener en cada recarga es el que se muestra en la ecuación 5.2.

Ahora para calcular el tanque de almacenamiento del lodo digerido para un tiempo de **1 mes** se procede de la siguiente manera:

$$T_{\text{almacenamiento}} = \text{Sustrato}_{\text{entrante}} (\text{m}^3/\text{año}) \frac{\text{Tiempo}_{\text{almcenamiento}}(\text{meses})}{12} - \text{VolumenDigestor} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

$$\text{Tanque de almacenamiento} = \left[ 15,185 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} \right] - 915.26 \text{ m}^3 = 350.15 \text{ m}^3$$

### 5.5.3 Producción de biogás

Ahora que ya se tiene el volumen del digestor y el tanque de almacenamiento del lodo digerido, se procede al cálculo de la producción estimada de biogás.

Producción de biogás=

$$\left[ M \cdot DM_M \cdot \frac{OM_M}{DM_M} \cdot \frac{m^3 \text{ biogás}}{kg OM_M} \cdot 1000 \right] + \left[ CS \cdot DM_{cs} \cdot \frac{OM_{cs}}{DM_{cs}} \cdot \frac{m^3 \text{ biogás}}{kg OM_{cs}} \cdot 1000 \right] \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde:

M: Desecho (Ton/año)

DM: Contenido de materia seca

OM/DM: Fracción orgánica de materia seca

OM: Producción de biogás por kg de desecho

CS: Otro sustrato.

Para este caso, como solo se cuenta con un sustrato que es el estiércol, la segunda parte de la ecuación es cero. Sustituyendo en la Ec. 5.4 se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Producción de biogás} &= \left[ 5155.3075 \frac{\text{Ton}}{\text{año}} (0.2)(0.8) \left( \frac{0.5 m^3}{kg} \right) (1000) \right] = 412,424.60 \frac{m^3 \text{ BIOGÁS}}{\text{año}} \\ &= 1,129.93 \frac{m^3 \text{ BIOGÁS}}{\text{día}} = 1,129,930.4 \text{ L/día} \end{aligned}$$

**1,129,930.4 L** diarios es una cantidad considerable a la cual se le puede dar diferentes aplicaciones.

#### 5.5.4 Almacenamiento del biogás

Para hacer uso del biogás en cualquier momento es necesario almacenarlo. Para calcular el tanque de almacenamiento se tiene lo siguiente:

$$\text{Volumen del tanque de almacenamiento} = \text{Producción diaria (m}^3/\text{día)} * 20\% \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$\text{V.T.A.} = 1,129.93 \text{ (m}^3/\text{día)} * 0.2 = 226 \text{ m}^3 = \mathbf{226,000 \text{ L}}$$

#### 5.5.5 Dimensiones del digestor

Ya se calculó el volumen del digestor, pero es necesario conocer cual será el tamaño aproximado para asignarle un lugar. El diámetro del digestor se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Diámetro del digestor} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{VolumenDigestor}(m^3)}{\text{AlturaDigestor}(m) \cdot 3.14}} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Se propone una altura de 5m para la pared del digestor, entonces el diámetro resultante sería:

$$D_{\text{digestor}} = 2 \left( \sqrt{\frac{1000m^3}{5m \cdot 3.14}} \right) = 15.96m$$

$$D_{\text{digestor}} \approx 16m$$

### 5.5.6 Cálculo del motogenerador

Una de las aplicaciones propuestas es instalar un motogenerador que funcione con biogás y así sustentar la demanda que tiene el hipódromo en cuanto a energía eléctrica. La propuesta es que trabaje en el horario pico que sería de 18:00 a 22:00 horas. Como se mencionó en el capítulo 4, la tarifa HM es horaria y se maneja en 3 bloques. La tarifa en hora pico es la de mayor costo; en enero de 2012, el costo por kWh (Fuente: CFE) es de \$2.12 (dos pesos con doce centavos m.n.). El horario pico es de 18:00 a 22:00 en horario de invierno y de 20:00 a 22:00 en horario de verano; para el cálculo se manejará el horario de 4 horas. Por lo tanto al año se tendrían **1,460** horas de operación del motogenerador. La tarifa OM no se maneja por horario, sin embargo, se manejará de forma generalizada, además en esta tarifa el consumo de energía es menor.

Si se considera que todo el biogás sería para el motogenerador, el cálculo queda de la siguiente manera, para una composición de 60% metano (CH<sub>4</sub>) y 40% bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se obtiene la cantidad de:

$$412,424.6 \frac{m^3 \text{BIOGÁS}}{\text{año}}$$

$$412,424.6 \frac{m^3 \text{BIOGÁS}}{\text{año}} \left( \frac{1 \text{año}}{1460 \text{hora}} \right) = 282.48 \frac{m^3 \text{BIOGÁS}}{\text{hora}}$$

El poder calorífico del biogás es de **5,900 kcal/m<sup>3</sup>**

$$282.48 \frac{m^3 \text{biogás}}{\text{hora}} \left( 5900 \frac{\text{kcal}}{m^3 \text{biogás}} \right) = 1,666,647.35 \frac{\text{kcal}}{\text{hora}}$$

$$1kWh = 860 \frac{\text{kcal}}{\text{hora}}$$

$$1,666,647.35 \frac{kcal}{hora} \left( \frac{1kWh}{860kcal} hora \right) = 1937.96kW_{th}$$

Este dato indica la cantidad de energía térmica que se tendrá por el metano contenido en el biogás generado.

La eficiencia de un motogenerador está alrededor de 35% por lo tanto se tiene:

$$1,937.96kW_{th} (0.35) = 678.28kWe \quad \text{Cantidad de kilowatts eléctricos a la salida.}$$

Por autogeneración se pierde otro 5%

$$678.28kWe(.95) = 644.37kWe$$

Como el hipódromo se encuentra en la Cd. De México, la altura es de 2600 m.s.n.m., aproximadamente, por lo tanto se tiene otra pérdida de eficiencia de 13% a 15%.

$$644.37kWe(0.85) = 547.71kWe$$

La capacidad del motogenerador será de **500kW**.

Con esa capacidad y trabajando a plena carga se tendrá las 4 horas al día que se proponen se tendrá:

$$500 \text{ kW}(4\text{h})=2000\text{kWh al día}$$

### 5.5.7 Ahorro estimado

Haciendo un cálculo estimado del ahorro se tendría:

$$\text{En energía eléctrica} \rightarrow 2000 \text{ kWh} (365) = 730,000 \text{ kWh en un año.}$$

$$\text{El ahorro económico} \rightarrow 730,000\text{kWh} (2.12 \text{ \$/kWh}) = \$ 1,547,600.00$$

Si se agrega el ahorro que se tiene por evitar que se lleven el estiércol del hipódromo, el cual tiene un costo por la colecta de residuos de las caballerizas de \$ 7,000.00 pesos al día

$$7,000.00 (365) = \$ 2,555,000.00 \text{ pesos al año.}$$

Por lo tanto el ahorro total se presenta en la Tabla 5.1. Si se hace uso del biogás para quemarlo en las cocinas y el excedente en un motogenerador, los resultados se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.1. Ahorro estimado usando biogás para generación eléctrica

Concepto	Cantidad	Total
Ahorro de energía eléctrica al año	\$ 1,547,600.00	
Ahorro por evitar la colecta al año	\$ 2,555,000.00	
Ahorro total al año		\$ 4,102,600.00

Para hacer la comparación entre el ahorro estimado entre el gas natural y el biogás se hará de manera energética, es decir, no se puede comparar volumetricamente a estos combustibles ya que no tienen la misma proporción de metano ( $\text{CH}_4$ ), por lo tanto, el aporte energético no es el mismo. La proporción de metano en el biogás es de 60% mientras que en el gas natural es prácticamente el 100%.

#### Aporte energético del biogás:

Volumen de biogás al mes:

$$34,368.72 \text{ m}^3$$

Densidad del biogás (60%  $\text{CH}_4$  y 40%  $\text{CO}_2$ ):

$$\rho = 0.848 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Poder calorífico del biogás:

$$\text{PC} = 23,997.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Calculando al energía aportada

$$\text{Masa del biogás} \rightarrow 34,368.72 \text{ m}^3 \left( 0.848 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) =$$

$$\text{Masa}_{\text{biogás}} = 29,144.67 \text{ kg}_{\text{biogás}}$$

$$\text{Energía aportada} \rightarrow 29,144.67 \text{ kg} \left( 23,997.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) =$$

$$\text{Energía}_{\text{biogás}} = 609,402,242.22 \text{ [kJ]}$$

#### Aporte energético de gas natural:

Volumen de gas natural demandado al mes:

$$10,121 \text{ m}^3$$

Densidad del gas natural (100%  $\text{CH}_4$ )

$$\rho = 0.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Poder calorífico del gas natural:

$$\text{PC} = 45,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Calculando al energía aportada

$$\text{Masa de GN} \rightarrow 10,121 \text{ m}^3 \left( 0.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) =$$

$$\text{Masa}_{\text{GN}} = 5060.5 \text{ kg}_{\text{GN}}$$

$$\text{Energía aportada} \rightarrow 5060.5 \text{ kg} \left( 45,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) =$$

$$\text{Energía}_{\text{GN}} = 227,722,500.0 \text{ [kJ]}$$

Ahora, si se convierte el consumo energético de gas natural a metros cúbicos de biogás se tiene:

$$227,722,500.0 \text{ kJ} \left( \frac{1 \text{ kg}}{23,997.6 \text{ kJ}} \right) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{0.848 \text{ kg}} \right) = 11,190.3 \text{ m}^3_{\text{biogás}} \text{ por mes.}$$

Tabla 5.2 Ahorro estimado con gas

Concepto	kJ
Demanda de energía de gas natural en cocinas	<b>227,722,500.0</b>
Producción de energía de biogás	<b>609,402,242.22</b>
Excedente de energía de biogás	<b>381,679,742.22</b>
Ahorro de energía promedio	<b>227,722,500.0</b>

Nota: El precio aproximado por m<sup>3</sup> del gas natural es de \$5.05

Ahorro estimado en pesos, considerando que se dejaría de consumir los 10,121m<sup>3</sup> de gas natural.

$$10,121m^3 \left( 5.05 \frac{\text{pesos}}{m^3} \right) = 51,111.1 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}}$$

$$\text{Ahorro anual en gas natural} \rightarrow \$51,111.10 \frac{\text{pesos}}{\text{mes}} \left( \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \right) = \$ 613,333.2 \frac{\text{pesos}}{\text{año}}$$

Si se recalcula el nuevo motogenerador con el flujo de biogás que se tiene de excedente se obtiene:

$$34,368.72 \text{ m}^3 - 11,190 \text{ m}^3 = 23,178.72 \text{ m}^3 \text{ al mes}$$

#### Motogenerador de 369.38kW<sub>e</sub>

Producción eléctrica de energía → 300kW (4h) = 1200kWh

En energía eléctrica → 1200 kWh (365)=438,000 kWh en un año.

El ahorro económico → 438, 000kWh (2.12 \$/kWh) = \$ 928,560.00

En la Tabla 5.3 se muestra el resumen de los cálculos realizados estimando el ahorro para la producción de energía eléctrica a partir de biogás generado.

Tabla 5.3 Ahorro estimado usando biogás para generación eléctrica

Concepto	Cantidad	Total
Ahorro de energía eléctrica al año	\$ 928,560.00	
Ahorro por evitar la colecta al año	\$ 2,555,000.00	
Ahorro total al año en gas	\$ 613,332.00	
Ahorro en electricidad, colecta y gas al año.		

### 5.5.8 Indicadores económicos

En la Tabla 5.4 se muestra la inversión inicial del proyecto que se necesita para colocar el reactor en el hipódromo, así como las conexiones para alimentar a las cocinas (ver Tabla 5.8 de anexos)

Tabla 5.4 Inversión total

Concepto	Precio (pesos, MN)
Ducto de gas	150,000.00
Motogenerador	500,000.00
Precio de instalación	300,000.00
Sub total	950,000.00
IVA	142,500.00
Impuesto por importación	13,600.00
Total	101,600.00
Precio del digestor	2,000,000.00
<b>Total de inversión (pesos)</b>	<b>3,106,100.00</b>

La Tabla 5.5 muestra los indicadores de la inversión económica; la relación beneficio costo (B/C) es muy factible, así como el tiempo de recuperación que es 0.76 años, mientras que la TIR calculada por medio de la ecuación 3.5, satisface el criterio de ser mayor a la tasa de interés, por lo que la rentabilidad del proyecto es aceptable.

Tabla 5.5 Indicadores económicos del proyecto

<b>Relación B/C</b>	<b>2.66</b>
<b>Periodo de recuperación</b>	<b>0.76</b>
<b>TIR (Excel)</b>	<b>130.9%</b>
<b>TIR CALCULADA (Ec. 3.5)</b>	<b>16.8%</b>

En la Tabla 5.8 se tiene los datos con los que se obtuvo el VPN (Ec. 3.3); se calculó el VPN para egresos e ingresos. Se tiene una tasa de interés del 12%, los flujos están especificados en la Tabla 5.8

Tabla 5.6 Egresos totales

VPN EGRESOS	-\$169,506.69
INVERSIÓN	-3,106,100.00
TOTAL EGRESOS	-\$3,275,606.69

El VPN de egresos se calculó conforme a la Ecuación 3.3:

$$VPN = \sum_{t=1}^{10} \frac{FE_t}{(1+r)^t} = \frac{-30,000}{(1+0.12)^1} + \frac{-30,000}{(1+0.12)^2} + \dots + \frac{-30,000}{(1+0.12)^{10}} = -169,506.69$$

Tabla 5.7 Ingresos totales

VPN INGRESOS GN	\$3,465,464.29
VPN INGRESOS EE	\$5,246,571.10
VP DEPRECIACIÓN	\$14,488.80
TOTAL INGRESOS	\$8,726,524.18

A continuación se presentan los cálculos del Valor Presente Neto para el gas natural y la energía eléctrica, así como el cálculo de la TIR para el proyecto. Estos cálculos se hicieron conforme a las Ecuaciones 3.3 y 3.6.

$$VPN_{GN} = \sum_{t=1}^{10} \frac{FE_t}{(1+r)^t} = \frac{613,332.0}{(1+.12)} + \frac{613,332.0}{(1+0.12)^2} + \frac{613,332.0}{(1+0.12)^3} + \dots + \frac{613,332.0}{(1+0.12)^{10}} = 3,465,464.29$$

$$VPN_{EE} = \sum_{t=1}^{10} \frac{FE_t}{(1+r)^t} = \frac{928,560.0}{(1+.12)} + \frac{928,560.0}{(1+0.12)^2} + \frac{928,560.0}{(1+0.12)^3} + \dots + \frac{928,560.0}{(1+0.12)^{10}} = 5,246,571.10$$

$$TIR = \frac{-3,106,100 + 4,066,892 + 4,066,892 + 4,066,892 + \dots + 4,066,892}{4,066,892 + 2(4,066,892) + 3(4,066,892) + \dots + 10(4,066,892)} = 0.1679$$

$$B/C = \frac{\$8,726,524.18}{\$3,275,606.69} = 2.66$$

$$P_{recuperación} = \frac{3,106,100.00}{4,096,892} = 0.76 \text{ años}$$

Para el cálculo del VPN total se hará conforme a la Ecuación 3.4

$$VPN = \sum_{t=1}^{10} \frac{FE_t}{(1+r)^t} - I_0 = \frac{4,066,892}{(1+0.12)^1} + \frac{4,066,892}{(1+0.12)^2} + \dots + \frac{4,066,892}{(1+0.12)^{10}} - 3,106,100 = 19,872,749$$

El criterio indica que el VPN debe ser 0 o mayor a cero, para este caso se tiene un valor positivo, por lo tanto, el valor del proyecto tendrá un incremento equivalente al monto del Valor Presente Neto, es decir, el proyecto cumple con el objetivo de maximizar la inversión.

Tabla 5.8 Flujos estimados del proyecto

CONCEPTO	año	año	año	año	año	año	año	año	año	año	año
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Inversión inicial</b>	-3,106,100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Mantenimiento</b>	0	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000
<b>Depreciación en libros</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45,000
<b>Ahorro por NO recolecta</b>		2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000	2,555,000
<b>Ahorro GN</b>	0	613,332	613,332	613,332	613,332	613,332	613,332	613,332	613,332	613,332	613,332
<b>Ahorro energía eléctrica</b>	0	928,560.00	928,560	928,560	928,560	928,560	928,560	928,560	928,560	928,560	928,560
EGRESOS TOTALES	-3,106,100	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000	-30,000
INGRESOS TOTALES	0	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892	4,096,892
SUMA	-3,106,100	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892	4,066,892

### 5.5.9 Emisiones evitadas

El gas metano ( $CH_4$ ) es un gas que contribuye al efecto invernadero 21 veces más que el bióxido de carbono  $CO_2$ . Al quemar el metano generado de manera controlada que se genera en un sistema anaerobio se reduce esta cantidad de emisiones a la atmósfera.

La cantidad de emisiones evitadas es la siguiente:

La producción anual de biogás es de **412,424.6 m<sup>3</sup>**

Se tiene 60% de  $CH_4$  en el biogás → **247,454.76 m<sup>3</sup>**

La EPA (Environmental Protection Agency) maneja la equivalencia de 1m<sup>3</sup> de  $CH_4$  es igual a 0.01428 Ton de  $CO_2$ , entonces se tiene:

$$247,454.76m^3CH_4 \left( 0.01428 \frac{TonCO_2}{m^3CH_4} \right) = 3,533.65TonCO_2 \text{ al año}$$

Este valor obtenido es la cantidad de emisiones que se tendrían al año si no se quemara el biogás, y esta contribución sería un equivalente a 21 veces el  $CO_2$  (Conde, 2006).

En la Tabla 5.9 se compara los resultados obtenidos en otros trabajos relacionados con éste, pero en ellos se usó otro tipo de residuos.

Tabla 5.9 Comparación de resultados experimentales

Residuo: Estiércol	caballo (Tesis)	llama (Álvarez, 2005)	vaca (Álvarez, 2005)	Trigo/paja para cama de caballo, (Zhifang Cui, 2011)
pH	6.8	7.8	7.8	7.4
Temperatura de operación	20.1	11-35	11-35	35
L de biogás por día	0.5	0.433	0.441	--
TRH	11	20	20	11-15
% $CH_4$	60	20-57	40-60	45-60
%ST	22	59.5	15.6	91.6
Producción de metano L de $CH_4$ por kg de desecho	500	69.5	43.9	150

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES**

La parte experimental de la tesis se llevó a cabo de manera satisfactoria. Se pudo analizar el comportamiento del estiércol de caballo para la producción de biogás así como la composición que presenta este desecho en el hipódromo y su degradación.

El pH del estiércol fue muy estable durante la operación del reactor del laboratorio, lo cual indica que no sería problema mantenerlo así una vez que se tenga escalado el reactor. Se podría decir que si solo dependiera del pH la producción de biogás estaría constante. El valor del pH se mantuvo la mayor parte del tiempo en 7, pero en promedio fue de 6.8 unidades.

La temperatura es un factor muy importante para la operación y desarrollo de las bacterias durante el proceso de la degradación anaerobia. Como se observa en la grafica Figura 5.5, cuando la temperatura descendió por debajo de los 20 °C el volumen de biogás generado disminuyó respecto a la producción que se tenía.

Debido a que los parámetros mencionados en el párrafo anterior se mantuvieron bastante estables, además de agregar inóculo a la mezcla al inicio de la operación del reactor de laboratorio, se obtuvo un TRH de 11 días de iniciado el proceso de operación.

Un inconveniente en la parte experimental es la trituración del estiércol ya que contiene paja y viruta de madera que se usan en las camas de los caballos, dichos elementos son un algo difíciles de degradar mecánicamente hasta el punto de un residuo más fino que el mismo estiércol.

En cuanto a la parte técnica y económica del estudio se puede concluir que:

La cantidad generada de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) es considerable y su potencial energético muy bueno. Después de hacer el escalamiento del digestor, se tiene que es posible hacer un sistema mixto, es decir, cubrir la demanda de gas en las cocinas mientras que el excedente de biogás se puede usar para generar energía eléctrica por medio de un motogenerador, esto conectándolo en paralelo a la red de CFE. La capacidad del motogenerador no es suficiente para cubrir toda la demanda eléctrica del hipódromo, pero se puede considerar una carga eléctrica cuya prioridad no sea de alta y la cual se pueda cubrir diariamente durante el horario pico.

De igual forma el hipódromo se ahorraría el costo por la colecta diaria de estiércol. Este ahorro sería de \$2,555,000.00 pesos al año.

La relación Beneficio-Costo (B/C) es de 2.66. El valor obtenido debe ser mayor a uno, así que dicho valor satisfactorio, esto significa que el proyecto es atractivo.

En cuanto al periodo de recuperación, se puede decir que es bastante bueno, 0.76 años; un ahorro que contribuye a que el tiempo de recuperación sea mejor es que se evita la colecta de basura, en este caso, el estiércol. EL ahorro por evitar la colecta de basura está casi a la par con el ahorro de energía eléctrica por año.

La TIR o Tasa Interna de Retorno fue de 16.8%. Para decir que es buena la TIR, debe cumplir con que sea mayor que la tasa de interés, en este caso, se maneja una tasa de interés del 12% por lo cual la TIR es aceptable.

El VPN o Valor Presente Neto fue de 19,872,749, es un valor fue positivo y mayor a cero, esto significa, que el valor del proyecto aumentará y la inversión es buena.

Otro punto importante son las emisiones de CO<sub>2</sub> que se evitan al ambiente por gases generados por la descomposición no controlada de RSO acumulados.

La cantidad evitada anualmente de emisiones son  $3,533.65 \left( \frac{\text{TonCO}_2}{\text{año}} \right)$

Este trabajo de tesis es un aporte importante debido a que en la ciudad de México no hay buena aplicación de este tipo de tecnología y si la propuesta que se plantea en la tesis se llega a llevar a cabo sería un gran comienzo para mostrar lo noble que puede llegar a ser el uso de la biomasa. Actualmente en México el aprovechamiento de este recurso es limitado, en la mayor parte, a las granjas o ranchos, pero también hay aplicaciones industriales donde se está empezando a tener más consciencia por el manejo de este recurso además que se busca un ahorro económico.

## REFERENCIAS

- Alvarez, Rene. 2005. Biogas production from llama and cow manure at high altitude. IIDEPROQ, UMSA. La Paz, Bolivia. **Biomass and Bioenergy** 30:66-75.
- Anderson, R. 1984. The Fischer–Tropsch synthesis. Editorial Academic Press. Nueva York, EEUU.
- Anon, 1987. Our common future. Oxford University Press, Oxford: World Commission on Environment and Development. EEUU.
- Anon, 1994. Solar Energy. Scientific American, April Issue, p. 115.
- Anon, 1995a. Global energy perspectives to 2050 and beyond. Technical report. World Energy Council. Londres, Inglaterra.
- Anon, 1995b. Urban energy handbook. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD).
- Appel, H., Fu, Y., Friedman, S., Yavorsky, P. y Wender, I. 1971. Converting organic wastes to oil. US bureau of mines report of investigation No. 7560.
- Archer, A., Self, J., Guha, G. y Engelken, R. 2008. Cost and carbon savings from innovative conversion of agricultural residues (Part B). **Energy Sources**. 3:103–108.
- Balat, M. 2007. An overview of biofuels and policies in the European Union (Part B). **Energy Sources**. 2:167–181.
- Balat, M. 2008a. Mechanisms of thermochemical biomass conversion processes. Part 2: reactions of gasification. **Energy Sources**. 30:636–648.
- Balat M. 2008b. Mechanisms of thermochemical biomass conversion processes. Part 1: reactions of pyrolysis. **Energy Sources**. 30:620–635.
- Balat, M. 2008c. Mechanisms of thermochemical biomass conversion processes. Part 3: reactions of liquefaction. **Energy Sources**. 30:649–659.
- Balat, M. 2008d. Biodiesel fuel production from vegetable oils via supercritical ethanol transesterification. **Energy Sources**. 30:429–440.
- Balat, M. 2009a. New biofuel production technologies (Part A). **Energy Educ. Sci. Technol.** 22:147–161.
- Balat, M. 2009b. Possible methods for hydrogen production (Part A). **Energy Sources**. 31:39–50.
- Bakis, R. 2008. Alternative electricity generation opportunities. **Energy Sources**. 30:141–148.
- Battjes, J. 1994. Global options for biofuels from plantations according to IMAGE simulations. Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde (IVEM), Rijksuniversiteit Groningen, Nijenborgh 4, 9747 AG Groningen. Países Bajos.
- Börjesson, P. 2009. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what determines this?. **Appl. Energy**. 86:589–594.

- Carballo, L., Silveria, J., Gogoy, E., Zanzi, R. y Márquez, F. 2005. Energía a partir del biogás, gas de madera y sistemas fotovoltaicos en propiedades rurales. *Rev. ciênc. Exatas*. 11(1):53-61.
- Conde Álvarez Luis, 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Demirbas, A. 2005. Bioethanol from cellulosic materials: a renewable motor fuel from biomass. *Energy Sources*. 27:327–337.
- Demirbas, A. 2007a. Production of biofuels from macroalgae and microalgae. *Energy Educ. Sci. Technol.* 18:59–65.
- Demirbas, A. 2007b. Modernization of biomass energy conversion facilities. *Energy Sources*. 2:227–235.
- Demirbas, A. 2007c. Alternatives to petroleum diesel fuel. *Energy Sources*. 2:343–351.
- Demirbas, A. 2007d. Production of gasoline and diesel fuels from bio-materials. *Energy Sources*. 29:753–760.
- Demirbas, A. 2008a. Recent progress in biorenewable feedstocks. *Energy Educ. Sci. Technol.* 22:69–95.
- Demirbas A. 2008b. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Convers. Manage.* 49:2106–2116.
- Demirbas, A. 2008c. The sustainability of combustible renewables. *Energy Sources*. 30:1114–1119.
- Demirbas, A. 2008d. Bio-fuels from agricultural residues. *Energy Sources*. 30:101–109.
- Demirbas, A. 2008e. Present and future transportation fuels. *Energy Sources*. 30:1473–1483.
- Demirbas, A. 2008f. The importance of bioethanol and biodiesel from biomass. *Energy Sources*. 3:177–185.
- Demirbas, A. 2008g. Economic and environmental impacts of the liquid biofuels. *Energy Educ. Sci. Technol.* 22:37–58.
- Demirbas, A. 2008h. Effect of alkali on liquid yield of pyrolysis from olive oil. *Energy Sources*. 30:1060–1064.
- Demirbas, A. 2008i. Liquefaction of biomass using glycerol. *Energy Sources Part A* 2008;30:1120–6.
- Demirbas, A. 2008j. Products from lignocellulosic materials via degradation processes. *Energy Sources*. 30:27–37.
- Demirbas, A. 2008k. Producing bio-oil from olive cake by fast pyrolysis. *Energy Sources*. 30:38–44.
- Demirbas, A. 2008L. Partial hydrogenation effect of moisture contents on combustion heats of oils via pyrolysis from biomass. *Energy Sources*. 30:508–515.

- 
- Demirbas, A. 2008m. Oils from hazelnut shell and hazelnut kernel husk for biodiesel production. *Energy Sources*. 30:1870–1875.
  - Demirbas, A. 2008n. Biodiesel production via rapid transesterification. *Energy Sources*. 30:1830–1834.
  - Demirbas, A. 2009a. Overview of bioethanol from biorenewable feedstocks: technology, economics, policy and impacts. *Energy Educ. Sci. Technol.* 22:163–177.
  - Demirbas, B. 2009b. Biofuels for internal combustion engines. *Energy Educ. Sci. Technol.* 22:117–132.
  - Demirbas, C. 2009c. The global climate challenge: recent trends in CO2 emissions from fuel combustion. *Energy Educ. Sci. Technol.* 22:179–193.
  - Demirbas, A. 2009d. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Convers. Manage.* 50:14–34.
  - Demirbas, A. 2009e. Inexpensive oil and fats feedstocks for production of biodiesel. *Energy Educ. Sci. Technol.* 23:1–13.
  - Demirbas, A. 2009f. Production of biodiesel from algae oils. *Energy Sources*. 31:163–168.
  - Demirbas, A. y Dincer, K. 2008. Sustainable green diesel: a futuristic view. *Energy Sources*. 30:1233–1241.
  - Dincer, I. y Rosen, M. 1998. A worldwide perspective on energy, environment and sustainable development. *International Journal of Energy Research*. 22(15):1305-1321.
  - Dincer, I. 1998a. Renewable energy, environment and sustainable development. En: Proceedings of the World Renewable Energy Congress, 20-25 September. p. 2559-2562. Florencia, Italia.
  - Dincer, K. 2008b. Lower emissions from biodiesel combustion. *Energy Sources*. 30:963–968.
  - EC, 1997. Energy for the future: renewable sources of energy. White paper for a community strategy and action plan. Publicación de la Comisión Europea.
  - Fells, I. 1990. The problem. En: Dunderdale J, editor. Energy and the environment. UK: Royal Society of Chemistry. Reino Unido.
  - FH, 2005. Biodigestores. Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes. Publicación de Fundación Hábitat. 2 de Abril. Quimbaya, Quindío, Colombia.
  - Fischer, G. y Schrattenholzer, L. 2001. Global bioenergy potentials through 2050. *Biomass and Bioenergy*, 2001. 20: p. 151–159.
  - Gercel, H. y Gercel, O. 2007. Bio-oil production from an oilseed by-product: fixed-bed pyrolysis of olive cake. *Energy Sources*. 29:695–704.
  - Goldemberg, J. y Coelho, S. 2004. Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*. 32:711–714.
-

- GTZ, 2011. Biogas Digest. Volume III Biogas - Costs and Benefits and Biogas – Programme Implementation. Information and Advisory Service on Appropriate Technology. Publicación de: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Berlín, Alemania.
- Hacisaligoglu, S. 2009. Ethanol–gasoline and ethanol–diesel fuel blends. *Energy Educ. Sci. Technol.* 22:133–146.
- Hall, D. 1997. Biomass energy in industrialised countries—a view of the future. *Forest Ecology and Management.* 91:17–45.
- Hall, D., Scrase, J. y Rosillo-Calle, F. 1997. Biomass energy: the global context now and in the future. *Aspects of Applied Biology.* 49:1–10.
- Hall, D. y Scrase, J. 1998. Will biomass energy be the environmentally friendly fuel of the future? *Biomass and Bioenergy.* 15(4–5):357–67.
- Hammond, G., Kallu, S. y McManus, M. 2008. Development of biofuels for the UK automotive market. *Appl. Energy.* 85:506–15.
- Hartley, D. 1990. Perspectives on renewable energy and the environment. En: Tester JW, Wood DO, Ferrari NA, editors. Energy and the environment in the 21st Century. Massachusetts, EEUU.
- Hernández H. A., 1996. Formulación y evaluación de proyectos de inversión para principiantes. ECAFSA. Thomson, Learning.
- Hilbert, 2011. Manual para producción de biogás. Publicación del Instituto de Ingeniería Rural. I.N.T.A.- Cautelar. Paraguay.
- Hoffert, M., Caldeira, K., Jain, A., Haites, E., Harvey, L., Potter, S., Schlesinger, M., Schneider, S., Watts, R., Wigley, T. y Wuebbles, D. 1998. Energy implications of future stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub> content. *Nature.* 395:881–884.
- Humbad, A., Kumar, S. y Babu, B. 2009. Carbon credits for energy self sufficiency in rural India—a case study. *Energy Educ Sci Technol.* 22:187–197.
- IIASA, 2011. Global Energy Perspectives. Publicación de International Institute for Applied Systems Analysis y World Energy Council. Luxemburgo, Austria.
- IEA, 2008a. World Energy Outlook 2008. International Environment Agency. CO, EEUU.
- IEA, 2008b. World Energy Outlook 2008 key-stats. International Environment Agency. París, Francia
- Ilkilic, C. y Yucesu, H. 2008. The use of cottonseed oil methyl ester on a diesel engine. *Energy Sources.* 30:742–753.
- Johansson, T., Kelly, H., Reddy, A. y Williams, R. 1993. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, DC: Island Press. Washington, EEUU.
- Kartha, S. y Larson, E. 2000. A bioenergy primer: Modernized biomass energy for sustainable development. New York: United Nations Development Programme. Nueva York, EEUU.

- Keskin, A. 2009. Biodiesel production from free fatty acids obtained with neutralization of the crude glycerin. *Energy Sources*. 31:17–24.
- Lappe, F. 2010. Nuevas Tecnologías: Biogás, Reactor Hidrólisis y Ampliación de una planta existente. Tesis de Ingeniero Químico Administrador. Instituto Tecnológico de Monterrey campus Monterrey. México, D.F., México.
- López, J., Gómez, A., Aparicio, F. y Sánchez, F. 2009. Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid. *Appl. Energy*. 86:610–615.
- Lv, P., Wang, X., Yuan, Z. y Tan, T. 2008. Conversion of soybean oil to biodiesel fuel with immobilized *Candida lipase* on textile cloth. *Energy Sources*. 30:872–879.
- MacRae, K. 1992. Realizing the benefits of community integrated energy systems. Alberta: Canadian Energy Research Institute. Canadá.
- Marbe, Å. y Harvey, S. 2006. Opportunities for integration of biofuel gasifiers in naturalgas combined heat-and-power plants in district-heating systems. *Appl. Energy*. 83:723–748.
- McGowan, J. 1990. Large-scale solar/wind electrical production systems-predictions for the 21st Century. En: Tester JW, Wood DO, Ferrari NA, editors. Energy and the environment in the 21st Century. Massachusetts, EEUU.
- Mohan, D., Pittman, C. y Steele, P. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels*. 848–889.
- Molten, P., Demmitt, T., Donovan, J. y Miller, R. 1983. Mechanism of conversion of cellulose wastes to liquid in alkaline solution. In: Klass DL, editor. Energy from biomass and wastes III. Chicago (IL): Institute of Gas Technology; 1983. p. 293. Chicago, Illinois, EEUU.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Tavakoli, T., Buttsworth, D., Yusaf, T. y Faizollahnejad, M. 2009. Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network. *Appl. Energy*. 86:630–639.
- Norton, R. 1991. An overview of a sustainable city strategy. Report Prepared for the Global Energy Assessment Planning for Cities and Municipalities. Montreal, Quebec, Canadá.
- Rosen, M. 1996. The role of energy efficiency in sustainable development. *Technology and Society*. 15(4):21-26.
- Prins, M., Ptasiński, K. y Janssen, F. 2004. Exergetic optimisation of a production process of Fischer–Tropsch fuels from biomass. *Fuel Process Technol.* 86:375–389.
- Ravindranath, N., Hall, D. 1995. Biomass, energy, and environment: a developing country perspective from India. Oxford, UK: Oxford University Press. EEUU.
- Reyes, J. 2010. Generación de energía eléctrica a partir de residuos con biodigestores. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería Ciudad Universitaria, UNAM. México, D.F., México.
- Schulz, H. 1999. Short history and present trends of FT synthesis. *Appl. Catal.* 186:1–16.

- Tan, R., Foo, D., Aviso, K. y Ng, D. The use of graphical pinch analysis for visualizing water footprint constraints in biofuel production. *Appl. Energy*. 86:605–609.
- Tchobanoglous, G., Theissen, H. y Eliassen, R. 1982. Desechos sólidos. Principios de ingeniería y administración. Ambiente y los Recursos Naturales Renovables. Publicación de la Organización Panamericana de la Salud. Washington, D.C. EEUU.
- Sastry, G., Murthy, A., Prasad, P., Bhuvanewari, K. y Ravi, P. 2006. Identification and determination of bio-diesel in diesel. *Energy Sources*. 28:1337–1342.
- SENER, 2004. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. Publicación de la Secretaría de la Energía. México, D.F., México.
- SENER-GTZ, 2009. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. Publicación de la Secretaría de la Energía. México, D.F., México.
- Shieh, C., Liao, H., Lee, C. 2003. Optimization of lipase-catalyzed biodiesel by response surface methodology. *Biores. Technol.* 88:103–106.
- Sie, S., Krishna, R. 1999. Fundamentals and selection of advanced FT-reactors. *Appl. Catal.* 186:55–70.
- Sigar, C., Soni, S., Mathur, J. y Sharma, D. 2009. Performance and emission characteristics of vegetable oil as diesel fuel extender. *Energy Sources*. 31:139–148.
- Thamsiriroj, T. y Murphy, J. 2009. Is it better to import palm oil from Thailand to produce biodiesel in Ireland than to produce biodiesel from indigenous Irish rape seed?. *Appl. Energy*. 86:595–604.
- Tijmensen, M., Faaij, A., Hamelinck, C. y van Hardeveld, M. 2002. Exploration of the possibilities for production of Fischer–Tropsch liquids and power via biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**. 23:129–152.
- WWEA, 2009. World Wind Conference. Publicación de World Wind Energy Association. Jeju, Korea.
- Zhifang, Cui. Jian, Shi. 2011, Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall. Qingdao, China Bioresource Technology 102: 9432–9437