



**UNIVERSIDAD DON BOSCO  
VICERRECTORÍA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN  
“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO  
DE LA BIOMASA A PARTIR DE LOS DESECHOS SÓLIDOS  
RECIBIDOS EN EL RELLENO SANITARIO MIDES”**

**PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAESTRO EN GESTION DE ENERGIAS RENOVABLES**

**ASESOR:  
MSC. CESAR GALDAMEZ**

**PRESENTADO POR:  
WILMER EDMUNDO PÉREZ  
JOSÉ MARIO MENÉNDEZ  
CARLOS EDUARDO LÍQUEZ**

**Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, Centroamérica**

**Mayo 2017**

## INDICE

<b>Glosario</b>	4
<b>Prefacio</b>	5
<b>Introducción</b> .....	6
<b>Bibliografía</b> .....	42
<b>Capítulo 1</b>	7
<b>Marco Teórico</b> .....	7
1.1	Plan Maestro para Desarrollo de las Energías Renovables en El Salvador ..... 7
1.2	Que es Biomasa ..... 9
1.3	Teoría de la Gasificación ..... 10
1.4	Tecnología de Conversión Térmica..... 12
1.4.1	Tecnologías de gasificación y pirolisis..... 14
1.5	Digestión Anaerobia ..... 16
1.6	Poder Calorífico Teórico ..... 23
<b>Capítulo 2</b>	25
	<b>Caracterización de los desechos sólidos recibidos y dispuestos en el Relleno Sanitario MIDES</b> ..... 25
2.1	Proceso de manejo de los Desechos Sólidos, desde su generación hacia Planta de Transferencia..... 25
2.2	Proceso de Recepción y Disposición de los Desechos Sólidos en Relleno Sanitario MIDES. .... 26
2.3	Promedio de Desechos Sólidos Ingresado en Relleno Sanitario MIDES..... 27
2.4	Identificación Experimental y Teórica del Poder Calorífico de los Desechos Sólidos Recibidos en Relleno Sanitario MIDES. .... 28
2.5	Análisis de Laboratorio para determinar el Poder Calorífico. .... 32
2.6	Potencial de Generación ..... 34
2.7	Cálculos Teóricos de la Capacidad de Generación de Energía a partir de los Desechos Sólidos recibidos en el Relleno Sanitario de MIDES. .... 34
2.8	Análisis Comparativo de Proyectos ya Implementados en Otros Países..... 38
2.9	Efectos en la Matriz Energética al Implementar la Generación de Energía Eléctrica a partir de los Desechos Sólidos recibidos en el Relleno Sanitario MIDES..... 38

## Capítulo 3 40

<b>Conclusiones</b> .....	40
3.1 Disponibilidad de los Desechos Sólidos.....	40
3.2 Variación en el Poder Calorífico de los Desechos Sólidos.....	40
3.3 Cumplimiento de las Normas Ambientales .....	40
3.4 Factibilidad del Proyecto .....	41

## Índice de Tablas

Tabla 1.1: Inyección por tipo de recurso. ....	8
Tabla 1.2: Capacidad instalada de generación por recurso. ....	9
Tabla 1.3: Reacciones acetogénicas .....	20
Tabla 1.4 “Principales reacciones metanogénicas (Stams 1994; Ferguson et al., 1987).....	22
Tabla 1.5: Composición del Biogas.....	23
Tabla 1.6: “Poder calorífico teórico biomasa” .....	24
Tabla 2.1: Porcentaje composición de desechos municipales recibidos en MIDES .....	31
Tabla 2.2: Datos teóricos calculados por el grupo de tesis, a partir de la composición de los desechos sólidos determinada en el proceso de muestreo. ....	32
Tabla 2.3: Poder calorífico por categoría de desecho (BTU).....	35
Tabla 2.4: Cálculo de energía y potencia de los desechos.....	35
Tabla 2.5: Energía total a generar.....	36
Tabla 2.6: Material con valor comercial.....	36
Tabla 2.7: Material sin valor comercial, con los cuales se generará energía eléctrica.....	36
Tabla 2.8: Energía y Potencia de los desechos sólidos sin valor comercial .....	37
Tabla 2.9: Energía total a generar con los desechos sólidos sin valor comercial.....	37

## Índice de Gráficas

### Capítulo 1

Gráfica 2.1: Porcentaje de composición de desechos municipales recibidos en MIDES ...	31
---	----

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Procesos para la transformación de la biomasa con fines energéticos.....	10
Figura 1.2: Opciones de conversión térmica de RSU.....	13
Figura 1.3: Suministro de Aire a los Procesos.....	13
Figura 1.4: “Esquema de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo” .....	15
Figura 1.5: Esquema de los Diferentes Tipos de Gasificadores de Lecho Fijo” .....	16
Figura 1.6: “Esquema representativo proceso de producción de biogás .....	17
Figura 1.7: Esquema de Reacciones de la Digestión Anaerobia de Materiales Poliméricos .....	17
Figura 1.8: “Simplificación de la Ruta Metabólica de Embden-Meyerhof de Degradación de la Glucosa por las Bacterias Acidogénicas. ....	19
Figura 1.9: Esquema de reacciones de digestión anaerobia. ....	22
Figura 2.1: Certificado de análisis de arreglos de desechos clasificados MIDES.....	33
Figura 2.2: Fracciones de conversión aproximadas en un sistema de cogeneración.....	34
Figura 2.3: Diagrama matriz de desechos clasificados por valor comercial y no comercial .....	37

## Glosario

**Aeróbico:** Que suministra o facilita la entrada de oxígeno.

**Anaerobio:** Que se desarrolla en ausencia de oxígeno libre.

**Biomasa:** Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

**Desechos Sólidos:** Son los que ocupan un mayor porcentaje en el total de desechos o residuos que el ser humano genera debido a que gran parte de lo que se consume o se utiliza en la vida cotidiana.

**Energía Renovable:** Energía cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable, p. ej., la hidráulica, la solar o la eólica.

**Gasificación:** Es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno).

**Incineración:** Es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas.

**MIDES:** Manejo Integral de Desechos Sólidos

**Pirólisis:** Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (y de cualquier halógeno).

**Poder Calorífico:** Es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible. Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse en forma completa.

**Relleno Sanitario (RS):** Es un método diseñado para la disposición final de los desechos sólidos.

**RSU:** Residuos Sólidos Urbanos.

**MARN:** Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**BID:** Banco Interamericano de Desarrollo.

**CNE:** Consejo Nacional de Energía.

**MSW:** Municipal Solid Waste.

**IDAE:** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

**SIGET:** Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.

## Prefacio

A nivel mundial, el tema de la disposición de los desechos sólidos urbanos es sumamente relevante y se ve desde diferentes perspectivas, de acuerdo la situación particular de cada país. Hay algunos desarrollados, principalmente en Europa, donde se está impulsando la reducción a cero de sus desechos sólidos mediante el reciclaje, reúso y conversión térmica.

Gracias a los avances tecnológicos ya se desarrollaron tecnologías que permiten reducir a cero los desechos sólidos, esto hace poder enlazar los procesos de separación, reciclaje, reúso y destrucción de los mismos.

Sin duda alguna las oportunidades existen, pero el desarrollo e implementación de proyectos en nuestro país dependerá de acciones coordinadas entre las entidades municipales y gubernamentales, inversionistas y ciudadanos, en donde se incentiven y promuevan las tecnologías que pueden solucionar los múltiples problemas derivados de la disposición de los desechos sólidos que aquejan a los municipios del territorio nacional.

En El Salvador se constituyó el primer Relleno Sanitario en 1999, esto con el fin de erradicar los botaderos a cielo abierto. Aunque en dicho punto la legislación salvadoreña no prohibía de manera categóricamente los botaderos a cielo abierto. Fue hasta el año 2007 que los botaderos fueron prohibidos y se penalizaba no dar la disposición final de los desechos en un lugar autorizado por el MARN. Ese año el relleno sanitario MIDES tuvo un incremento de 64% de los desechos recibidos. Esto según los reportes operacionales presentados al MARN.

De los 262 municipios del país únicamente 132, es decir, el 50.4%, poseen algún tipo de servicio de recolección de desechos sólidos. La tasa de generación diaria de los desechos sólidos es de 0.64 kilogramos por habitante, determinado en el Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos MARN/BID 1209/OC-ES y de conformidad con la Dirección General de Estadísticas y Censo, el país cuenta con 6,459,911 habitantes para el 2015. Por lo tanto, la generación diaria de desechos sólidos se estima en 4,134.34 toneladas métricas.

Durante el año de operaciones 2015, un total de 691,221.47 Tm de Desechos Sólidos, fueron recibidos y dispuestos en el Relleno Sanitario de MIDES, S.E.M. DE C.V., lo que permite determinar un ingreso diario de Desechos Sólidos al Relleno Sanitario de MIDES de 1,893.76 toneladas métricas.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Informe de operaciones MIDES 2015.

## **Introducción**

El relleno sanitario es una obra de ingeniería diseñada para recibir desechos sólidos municipales, que cuenta con sistemas de captación de gas y lixiviados, con el objetivo de limitar los impactos negativos al medioambiente. Desafortunadamente, la gente tiende a confundir su imagen por la de sitios no controlados donde se generan malos olores, moscas, fauna nociva y donde se contamina el ambiente. En la realidad, estos sitios están diseñados cuidadosamente y preparados para operar durante el tiempo en que se confinan los residuos, manteniendo su cuidado por periodos de 30 años después de que el relleno se cierra.

La problemática de los municipios de nuestro país es diversa. La falta de inversión para convertir los tiraderos a cielo abierto, construir nuevos rellenos y las protestas sociales por los olores, fauna nociva y el paso del transporte, representan sólo una parte de la problemática. No obstante, es alentador que se ha iniciado la búsqueda de soluciones, y en conjunto con inversionistas, han establecido proyectos que se esperan obtener resultados satisfactorios y el reconocimiento de la población, sino que también han demostrado rentabilidad económica.

Dado que el volumen de desechos sólidos que se genera diariamente tiende a crecer, tanto por el incremento de la población, como por el hecho de que cada vez producimos más desechos sólidos per cápita, cualquier decisión que se tome hoy en día tendrá una repercusión en el futuro inmediato.

Las tecnologías que permiten gestionar los desechos sólidos en toda su cadena, ya sea para su reciclaje, procesamiento, incineración o confinamiento con recuperación de energía están disponibles, por lo que es urgente que los municipios establezcan una visión prospectiva y destinen los recursos para desarrollar los estudios de factibilidad que determinen las mejores soluciones.

El desarrollo de un proyecto de recuperación de energía, ya sea eléctrica o térmica, requiere del análisis del tipo y cantidad de desechos sólidos urbanos disponibles, del conocimiento profundo de las tecnologías en cuestión para seleccionar la idónea, de identificar el portafolio y récord de operación de los proveedores, de establecer los estudios de factibilidad técnica y económica, y finalmente del conocimiento de la gestión de permisos y trámites ante la autoridad.

El propósito de este trabajo es justamente presentar esta información para evaluar la viabilidad de desarrollar e implementar proyectos de esta índole.

# Capítulo 1

## Marco Teórico

### 1.1 Plan Maestro para Desarrollo de las Energías Renovables en El Salvador

De acuerdo con los estudios realizados para la creación del plan maestro, el CNE determina que con el actual crecimiento de la demanda de energía y la necesidad de buscar nuevas alternativas para la generación eléctrica, y la introducción de energías renovables surge la necesidad en El Salvador de formar un plan maestro y poder proyectar la implementación de tecnologías renovables, el cual, está enmarcado dentro del primer lineamiento de la Política Energética Nacional que plantea: “La Diversificación de la matriz energética y el fomento a las fuentes renovables de energía”.

Para lograr contar con una herramienta de tal tipo, fue necesario el apoyo del Consejo Nacional de Energía (CNE) y de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), con el fin de conocer el alcance que tiene el país para desarrollar y explotar las energías renovables; con esta herramienta se pretende diseñar una estrategia de desarrollo de las tecnologías alternativas.

Debido a la cantidad limitada de estudios, fue necesario realizar análisis previos antes de recomendar la introducción de ciertas tecnologías que utilizan fuentes de energía renovable como recurso para la generación de electricidad. Dichos análisis consideraron el nivel de desarrollo, penetración de la tecnología en el país, el avance de la industria en el mercado internacional, nivel de desarrollo de capacidades en el país, economías de escala, etc.

La formulación del Plan Maestro consideró siete tipos de fuentes de energía renovable<sup>2</sup>:

1. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, (de hasta 20 MW de capacidad)
2. Energía Eólica
3. Energía Solar Fotovoltaica
4. Energía Solar Térmica
5. Energía Geotérmica
6. Energía de Biomasa
7. Energía del Biogás

Para las primeras tres fuentes de energía antes mencionadas, las actividades se concentraron en los aspectos siguientes:

- 1) En las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas:
  - a) Preparar los lineamientos generales para determinar el potencial a pequeña escala.
  - b) Proponer aumentar su capacidad instalada.
  - c) Elaborar una guía práctica para desarrolladores.

---

<sup>2</sup> Plan Maestro para el Desarrollo de Energías Renovables en El Salvador CNE, publicación 2012

## 2) En Energía Eólica:

- a) Actualizar el mapa del potencial eólico de El Salvador.

## 3) En Energía Solar Fotovoltaica:

- a) Evaluar los aspectos a considerar en el desarrollo de los sistemas solares fotovoltaicos para montaje en techos en áreas urbanas de El Salvador.

Para el resto de las fuentes de energías renovables (energía solar térmica, geotérmica, biomasa, y biogás), se realizó el análisis sobre la base en la información disponible y se presentaron recomendaciones para poder afrontar los problemas técnicos y económicos que viabilicen su futura implementación.

### Situación del Sector Energético Nacional<sup>3</sup>

Con un aproximado de 91 % de hogares salvadoreños con acceso a electrificación, El Salvador es el segundo país en Centro América con mayor índice de electrificación después de Costa Rica. De las aproximadamente 137,812 familias que no tienen acceso a electricidad, 101,309 viven en áreas rurales.

El porcentaje de electrificación creció de un 77% en 1995 a un 94% en el 2012, siendo el área rural en donde se ha tenido un mayor crecimiento del 51% al 86% en 2012 alcanzando un 35% de crecimiento. El esfuerzo de las autoridades del país y otros actores participantes en el proceso de electrificación ha respondido a una serie de retos. El programa de electrificación fue dirigido hasta el año 2000 por el gobierno, y desde esta fecha se obtuvo la participación de gobiernos amigos y la empresa privada, permitiendo el desarrollo mostrado.

Se detalla en la tabla 1.1 los datos de inyección por cada uno del recurso.

Recurso	2013	2014	Variación
Hidroeléctrico	1,784.9	1,713.0	-4.0%
Geotérmico	1,442.4	1,443.9	0.1%
Térmico	2,355.3	2,404.1	2.1%
Biomasa	229.4	232.0	1.1%
Total Inyecciones Nacionales	<b>5,812.0</b>	<b>5,793.0</b>	<b>-0.3</b>
Importaciones Netas	283.3	380.7	34.4%
<b>Total</b>	<b>6,095.3</b>	<b>6,173.7</b>	<b>1.3%</b>

**Tabla 1.1: Inyección por tipo de recurso.**

**Fuente: Unidad de Transacciones, informe año 2014**

<sup>3</sup> Política Energética de El Salvador 2010-2024.

La capacidad instalada reportada por los operadores, al 31 de diciembre de 2014, ascendía 1,563.1 MW, manteniendo la potencia reportada en el 2013.

CAPACIDAD INSTALADA (MW)			
Recurso	2013	2014	Variacion
1- Guajoyo	19.8	19.8	0.0%
2- Cerrón Grande	172.8	172.8	0.0%
3- 5 de Noviembre	100.0	100.0	0.0%
4- 15 de Septiembre	180.0	180.0	0.0%
<b>Total de generacion Hidraulica</b>	<b>472.6</b>	<b>472.6</b>	<b>0.0</b>
5- Ahuachapan	95.0	95.0	0.0%
6- Berlin	109.4	109.4	0.0%
<b>Total de generacion Geotermica</b>	<b>204.4</b>	<b>204.4</b>	<b>0.0</b>
7- Duke Energy	338.3	338.3	
Acajutla			
a) Vapor	63.0	63.0	
b) Gas	82.1	82.1	
c) Motores	150.0	150.0	
d) FIAT U-4	27.0	27.0	
Soyapango	16.2	16.2	
8- Nejapa Power	144.0	144.0	
9- Holcim	25.9	25.9	
10- Inversiones Energeticas	100.2	100.2	
11- Textufile	42.5	42.5	
12- GECSA	11.61	11.61	
13- Energia Borealis	13.6	13.6	
14- HILCASA Energy	6.8	6.8	
15- Termopuerto Ltda	73.7	73.7	
16- CASSA	61.0	61.0	
Central Izalco	45.0	45.0	
Chaparrastique	16.0	16.0	
17- Ingenio El Angel	47.5	47.5	
18- Ingenio La Cabaña	21.0	21.0	
<b>Total de generacion Termica</b>	<b>886.1</b>	<b>886.1</b>	<b>0.0</b>
<b>Total</b>	<b>1,563.1</b>	<b>1,563.1</b>	<b>0.0</b>

**Tabla 1.2: Capacidad instalada de generación por recurso.**

Fuente: “Boletín Estadístico 16 del Sector de Electricidad 2014, SIGET”

## 1.2 ¿Qué es Biomasa?

“El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, caña de azúcar, etc), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego”<sup>4</sup>

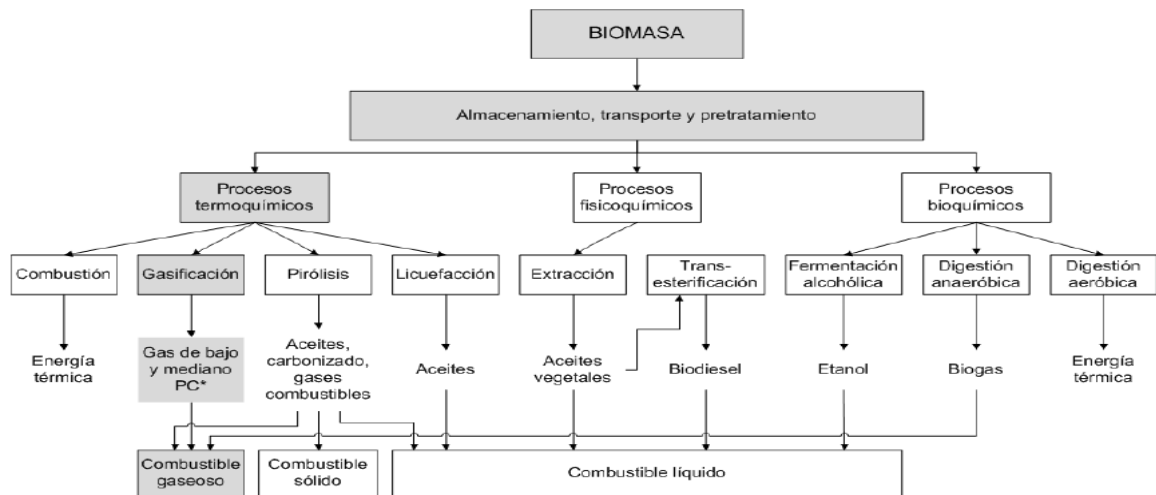
“La biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor procede del Sol, a través del proceso de la fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía y convierte el CO<sub>2</sub> del aire y agua del suelo en carbohidratos para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman liberan la energía que contiene regresando a su forma de CO<sub>2</sub> y agua”.

El uso energético de la biomasa se puede realizar mediante procesos bioquímicos (fermentación alcohólica, digestión anaeróbica y digestión aeróbica), termoquímicos (pirólisis, gasificación,

<sup>4</sup> Teoría general de biomasa”, Dr. Eduardo Badía

licuefacción y combustión) y fisicoquímicos (extracción y transesterificación). Estos procesos permiten el aprovechamiento directo o la generación de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, ya sea para uso in-situ o para almacenamiento, transporte y aplicaciones posteriores.

Las características de la biomasa residual que se encuentra en el país hacen de los procesos termoquímicos una alternativa viable para su aprovechamiento energético. Estos procesos tienen la ventaja adicional, de que su implementación no compete con el cultivo de productos alimenticios.”<sup>5</sup>



**Figura 1.1: Procesos para la transformación de la biomasa con fines energéticos**  
**Fuente: Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo,**  
**Universidad Nacional de Colombia 2011**

### 1.3 Teoría de la Gasificación

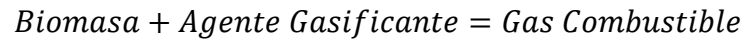
Conversión de la biomasa en un gas combustible que actúa como portador de energía mediante una oxidación parcial a alta temperatura (600 – 1500°C). Para ello, la cantidad de oxígeno se reduce a un tercio o hasta un quinto de la teóricamente requerida para producir una combustión completa. El objeto es producir un combustible cuyo poder calorífico dependerá de la atmósfera de gasificación, (o agente gasificante, medio gaseoso que reacciona con el combustible sólido desencadenando una serie de reacciones heterogéneas y homogéneas; generalmente, aire, oxígeno y/o vapor de agua) en la que se desarrolla el proceso, y del contenido de humedad del combustible.

La gasificación puede considerarse un caso de combustión incompleta. El producto es un gas pobre, compuesto esencialmente por monóxido de carbono, hidrógeno, agua y pequeñas cantidades de metano, etano, etileno, etc. En ella se presentan reacciones de pirólisis, oxidación (combustión) y reducción (gasificación).

<sup>5</sup> Modelación de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de Lecho Fijo, Universidad Nacional de Colombia 2011

Los reactores en los que generalmente se desarrolla el proceso pueden ser de lecho fijo o lecho fluidizado.

Un esquema general de la gasificación sería el siguiente:



Este gas combustible puede ser utilizado para generar movimiento en una turbina a gas, o para mover un motor o incluso en procesos químicos para síntesis de otros productos.

Otra definición de la gasificación es:

Tipo de pirolisis en la que se utiliza una mayor proporción de oxígeno a mayores temperaturas, con el objetivo de optimizar la producción del llamado “gas pobre”, constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con proporciones menores de dióxido de carbono y nitrógeno.

Este se puede utilizar para generar calor y electricidad, y se puede aplicar en equipos convencionales, como los motores de diésel. La composición y el valor calorífico del gas dependen de la biomasa utilizada, como, por ejemplo: madera, cascarilla de arroz, o cáscara de coco. Existen diferentes tecnologías de gasificación y su aplicación depende de la materia prima y de la escala del sistema.

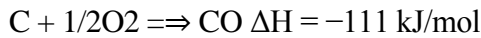
La gasificación tiene ciertas ventajas con respecto a la biomasa original:

- El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural;
- Puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad;
- Produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse. Sin embargo, la operación de gasificación es más complicada. En principio, un gasificador simple puede ser construido en talleres metalmecánicos convencionales, pero se requiere experiencia y un prolongado período de ajuste para llevar el sistema a sus condiciones óptimas de operación.

El agente de gasificación empleado para el proceso juega un papel importante en la composición del gas generado. Al utilizar aire se genera un gas pobre con un poder calorífico de 4 - 7 MJ/m<sup>3</sup> STP, debido a que el alto contenido de nitrógeno introducido en el aire se diluye en el gas producido. Al emplear oxígeno se obtiene un gas con un moderado poder calorífico de 10 - 15 MJ/m<sup>3</sup> STP y con vapor de agua se obtiene un gas con poder calorífico de 13 - 20 MJ/m<sup>3</sup> STP. Si se emplea hidrógeno, se puede llegar a obtener un gas con alto poder calorífico (40MJ/m<sup>3</sup> STP), que puede ser empleado como sustituto del gas natural.

Las principales reacciones que ocurren durante el proceso de gasificación son:

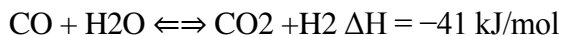
Reacciones de oxidación (Cuando se emplea aire u oxígeno como agente de gasificación)<sup>6</sup> :



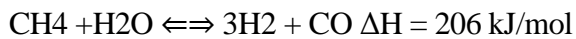
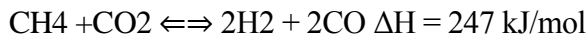
Reacciones de gasificación:



Reacción de conversión agua-gas:



Reacciones de reformado:



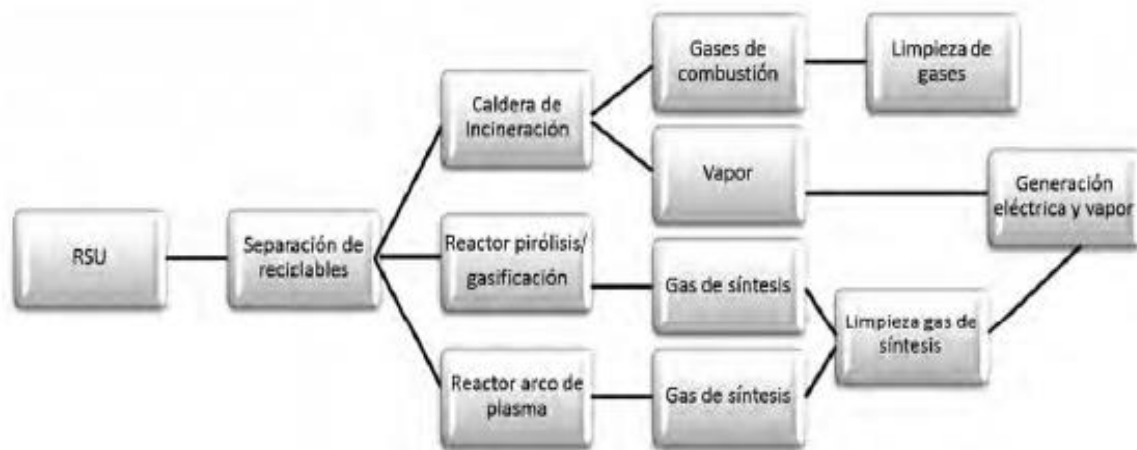
**Gas de rellenos sanitarios:** se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Este es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero

#### 1.4 Tecnología de Conversión Térmica

Existen tres tecnologías principales para la conversión térmica de los RSU: caldera de incineración, reactor de pirolisis/gasificación, y reactor de gasificación con arco de plasma. La figura 1.2 muestra esta clasificación, representando en el diagrama los productos intermedios de cada una de ellas y la generación de electricidad o vapor como producto final.

---

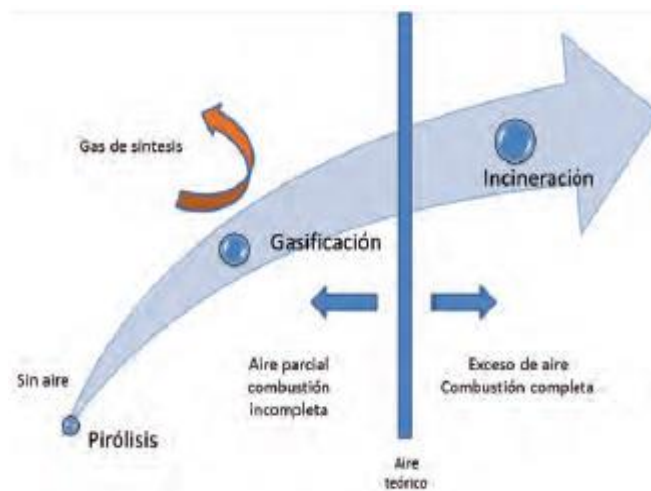
<sup>6</sup> Modelación de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de lecho fijo, Universidad Nacional de Colombia 2011



**Figura 1.2: Opciones de conversión térmica de RSU**

**Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, Primera Edición: octubre de 2012**

De acuerdo con la figura 1.3, la diferencia entre las tecnologías estriba en el aporte del aire de combustión para su proceso. Mientras que en la incineración se opera con altos excesos de aire para quemar el RSU, para los otros dos procesos se opera con un déficit de oxígeno, por lo que los RSU, en lugar de ser quemados son gasificados, obteniéndose un gas de síntesis.



**Figura 1.3: Suministro de Aire a los Procesos.**

**Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, Primera Edición: octubre de 2012**

Este gas, compuesto principalmente por CO y H<sub>2</sub>, puede utilizarse como combustible en una turbina de gas o un motor de combustión interna. En todos los procesos suelen involucrarse procesos muy eficientes de limpieza de gases para evitar emisiones contaminantes al medioambiente y proteger a los propios equipos de generación de procesos de corrosión/erosión.

Mientras que la incineración con recuperación de energía es un proceso que cuenta con un gran número de instalaciones a nivel mundial, los otros dos son de reciente desarrollo. A continuación, se hará una descripción de ellos, destacando su situación actual dentro del panorama energético mundial.

### 1.4.1 Tecnologías de gasificación y pirolisis

La gasificación es el calentamiento de los RSU para producir un gas de síntesis, el cual consiste básicamente de hidrogeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y algunos otros compuestos traza<sup>7</sup>.

La energía o poder calorífico del gas de síntesis varía entre 7.4 MJ/Nm<sup>3</sup> y 18.6 MJ/Nm<sup>3</sup> (este último representa aproximadamente la mitad que el gas natural). Una vez acondicionado, el gas de síntesis puede ser empleado como combustible auxiliar en calderas para la producción de calor y electricidad en turbinas, o bien puede transformarse en combustibles mediante síntesis química.

En la pirolisis, los RSU son calentados en ausencia de oxígeno o aire, generándose gas de síntesis similar al del proceso de gasificación. En ambos procesos se tiene como objetivo reducir los volúmenes de gases de combustión y los costos de tratamiento asociados. Cabe señalar que, dependiendo del diseño del reactor, el RSU requiere ser pre tratado. Algunas de estas técnicas se han encontrado con problemas técnicos y económicos al ser adaptadas a mayor escala para uso comercial industrial y han dejado de desarrollarse. Algunas se utilizan a escala comercial y otras están siendo ensayadas en plantas de demostración en Europa, pero en conjunto todavía representan solo una pequeña porción de la capacidad de tratamiento total, en comparación con la incineración.

Para nuestro caso mencionaremos dos tipos de reactores, uno de lecho fijo y lecho fluidizado:

- **Lecho Fijo**

Estos tipos de gasificadores son los más comunes, el combustible se introduce por la parte superior, quedando fijo dentro del reactor y reaccionando poco a poco con el flujo comburente que pasa a través, dependiendo de la categoría puede ser introducido por la parte inferior o intermedia. A diferencia de los otros tipos de reactores, en este los procesos de gasificación ocurren en diferentes partes del reactor, de forma estratificada. Normalmente sus tamaños y potencias no son tan elevados. No tienen limitación en el tamaño de las partículas de combustible, pueden utilizar un rango amplio de combustibles. Se categorizan según si la corriente de aire es en la misma dirección o equicorrientes, *downdraft*, en dirección contraria o contracorriente, *updraft* o con dirección cruzada, *crossdraft* (A. Das, 1988).

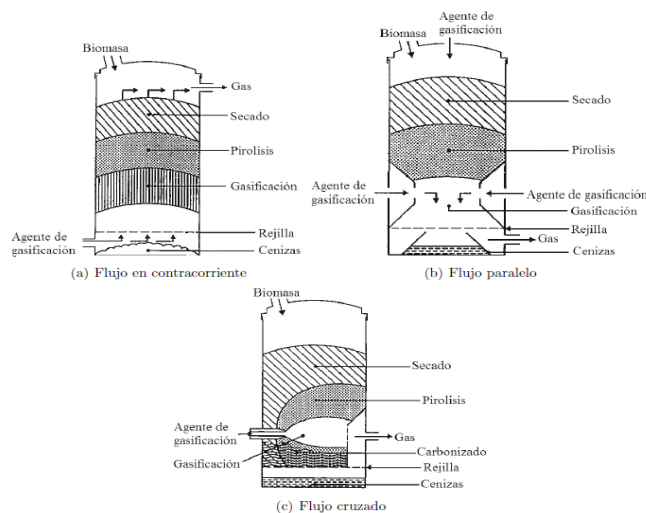
**Updraft:** Gasificador del tipo equicorriente donde el combustible es introducido por la parte superior del reactor y el aire o comburente se introduce por la parte inferior donde se sitúa la parrilla. Este tipo de gasificador tiene bien definidas las zonas de combustión parcial, reducción y pirólisis. El aire es introducido por la parte baja de gasificador y este circula en contracorriente. El gas combustible es expulsado por la parte superior a unas temperaturas relativamente bajas, ya que el calor sensible del gas es utilizado para precalentar y secar el combustible, con ello se logran altas eficiencias. Las desventajas que tiene este sistema de gasificación, son el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, por ende,

---

7 WASTE TO ENERGY. A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices. Preparado por Stantec Consulting for Environmental Quality Branch. Marzo 2011.

la imposibilidad de generación de gas continuo que redundaría en dificultades para la utilización en motores de combustión interna.

**Downdraft:** Los gasificadores downdraft se caracterizan por ser de lecho fijo y equicorrientes. El combustible sólido entra por la parte superior del reactor, experimentando inicialmente el secado y pirólisis debido al aumento progresivo de su temperatura. El gas y el sólido fluyen por gravedad hasta la denominada garganta del reactor, donde se introduce el agente oxidante, normalmente aire. En esta zona se alcanza la mayor temperatura del reactor sobre los 1000°C y ocurre también el craqueo del alquitrán producto de la reacción de pirólisis que continúa por debajo de la garganta. Esta configuración del reactor ayuda a la conversión del combustible a gas. En la parte inferior de la garganta se produce la reducción de los gases, alquitranes y carbón que aún no se han gasificado, aumentando la calidad y cantidad del gas combustible que se extrae. El gas pobre se extrae finalmente por la parte inferior del reactor con un contenido bajo en alquitranes que tiene la ventaja de poder ser usado en motores de combustión interna sin muchos filtros de limpieza (A. Das, 1988).



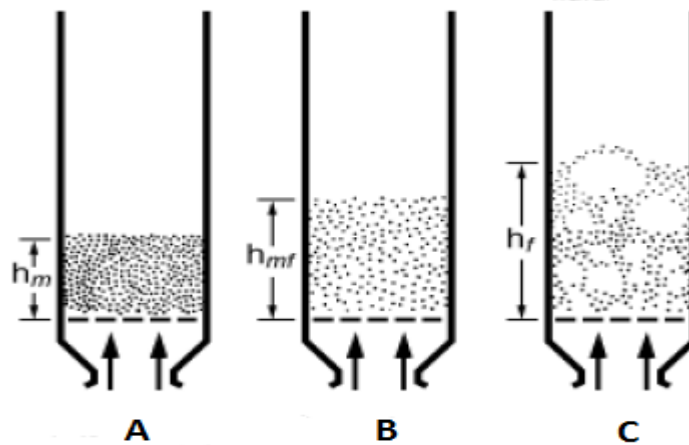
**Figura 1.4: “Esquema de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo”**

**Fuente: Modelación de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de Lecho Fijo, Universidad Nacional de Colombia, 2011.**

- **Lecho fluidizado**

En los gasificadores de lecho fluidizado el combustible y el medio gasificante es mezclado en un lecho caliente que se mantiene flotando, puede ser burbujeante o circulante. Las temperaturas que se registran en el reactor son menores que en los gasificadores tipo lecho de arrastre, en un rango de 800°C a 1000°C y es más sencillo controlarlo. Las cenizas no se fusionan debido a la baja temperatura y se retiran por la parte inferior del gasificador. Los gasificadores de esta categoría admiten un rango mayor en el tamaño de las partículas de combustible como también en la calidad de este, asimismo esta tecnología es válida para gasificar biomasa, residuos

municipales o combustibles mixtos (A. Das, 1988). El lecho granular trabaja como un intercambiador de calor siendo este intercambio alto dando un gas con un poder calorífico alto. Esta configuración permite tamaños grandes de grandes potencias por encima de 100 MW. Por otro lado, las temperaturas bajas no erradican la formación de alquitranes y dejan partículas no quemadas que disminuyen la eficiencia. La ilustración de abajo muestra la diferencia entre los reactores de lecho fijo (A), lecho fijo burbujeante (B) y lecho fijo circulante (C).



**Figura 1.5: Esquema de los Diferentes Tipos de Gasificadores de Lecho Fijo”**

**Fuente: Simulación Fluido-Térmica de un Reactor de Gasificación de Lecho Fijo Descendente, Pontificia Universidad Católica del Perú**

## 1.5 Digestión Anaerobia

### Definición

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

La digestión anaeróbica puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. La digestión anaeróbica también es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias alimentarias.

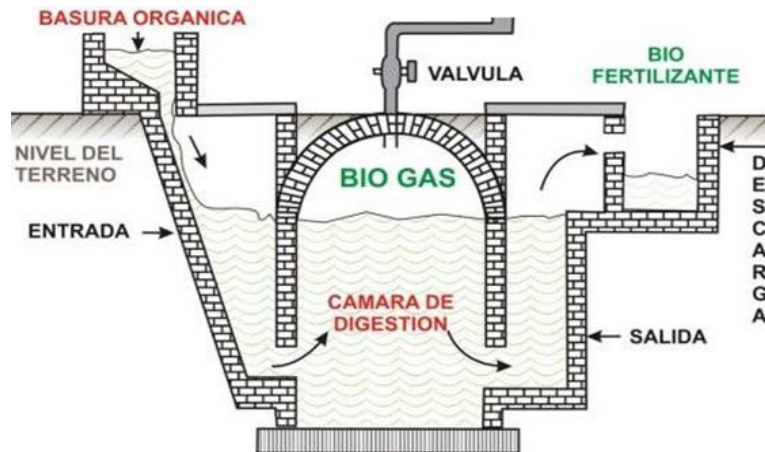


Figura 1.6: “Esquema representativo proceso de producción de biogás  
Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)

### Las fases de la digestión anaerobia

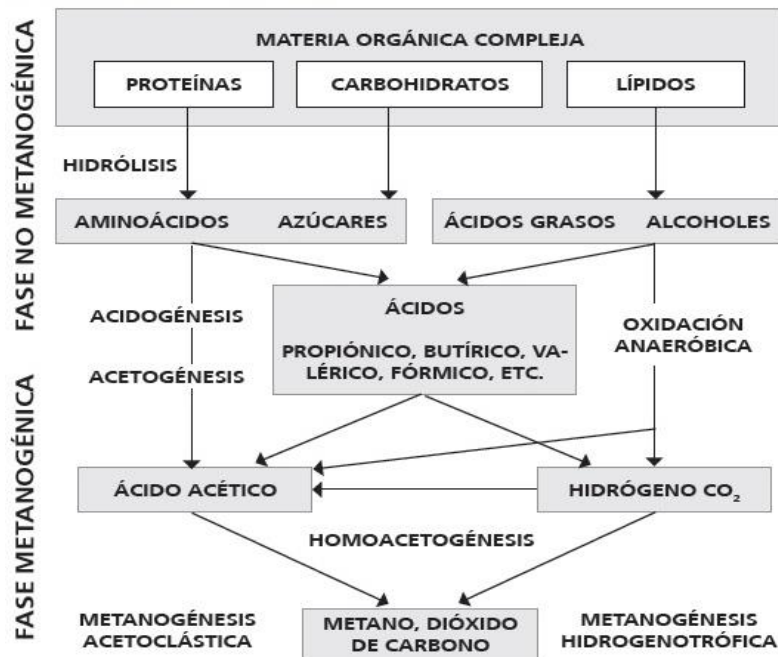


Figura 1.7: Esquema de Reacciones de la Digestión Anaerobia de Materiales Poliméricos  
Fuente: Kinetics of Anaerobic Treatment: A Critical Review. Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991.

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupo de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. El proceso de degradación de la materia orgánica se divide en cuatro etapas:

- a) **Hidrólisis.**
- b) **Etapa fermentativa o acidogénica.**

- c) **Etapa acetogénica.**
- d) **Etapa metanogénica.**

### **A. Etapa de Hidrólisis**

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, hidratos de carbono y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que son fermentados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.

La hidrólisis de la materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros es el paso inicial para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos, ya que los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaerobia. Como ya se ha comentado, la hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido en sólidos<sup>8</sup>. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del pH, de la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y de la concentración de los productos de la hidrólisis<sup>9</sup>.

Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos.

### **B. Etapa Acidogénica**

La segunda etapa, controlada por bacterias, consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera etapa en otros compuestos de peso molecular intermedio; como dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos y alcoholes alifáticos, metilamina, amoníaco y sulfhídrico. Esta etapa se denomina acidogénesis.

---

<sup>8</sup> Kinetics of Anaerobic Treatment: A Critical Review. Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991.

<sup>9</sup> Anaerobic biotechnology for Industrial Wastewater Treatment. RE. Speece, 1983.

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>), y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso.

### Fermentación de carbohidratos solubles.

La principal ruta metabólica de degradación de glucosa para formar ácidos orgánicos es la de Embden-Meyerhof (Figura 1.8) que tiene como principal intermediario el piruvato.

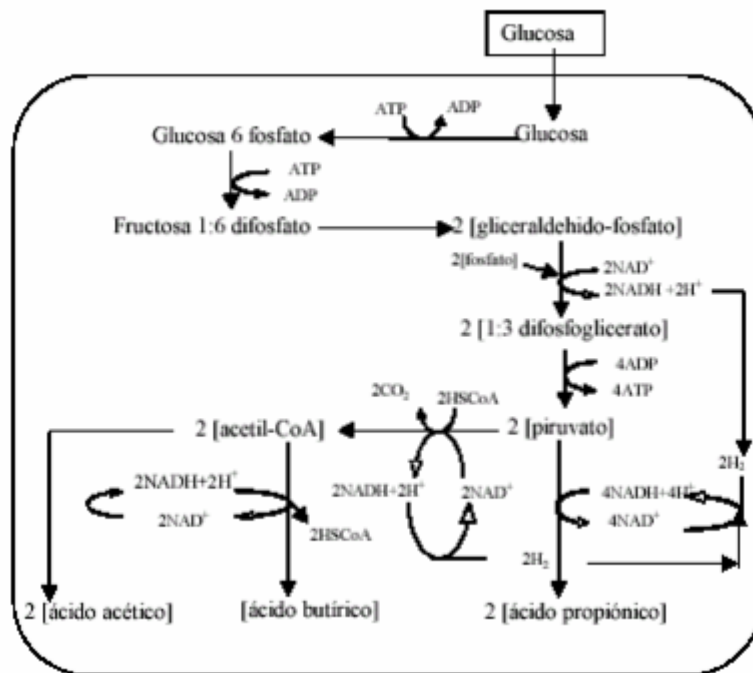


Figura 1.8: “Simplificación de la Ruta Metabólica de Embden-Meyerhof de Degradación de la Glucosa por las Bacterias Acidogénicas.

La fermentación de azúcares se realiza por diversos tipos de microorganismos. En función de cada organismo, la ruta metabólica y los productos finales son diferentes.

Los principales microorganismos asociados a la degradación de la glucosa son del género *Clostridium* y convierten la glucosa en butírico, acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. La glucosa se convierte en piruvato mediante la ruta Embden-Meyerhof, y el piruvato se desdobra a Acetil-CoA y CO<sub>2</sub>. El Acetil-CoA se reduce en los productos de fermentación empleando como transportador de electrones el NADH derivado de las reacciones glucolíticas de la ruta Embden-Meyerhof.

### Fermentación de aminoácidos

Los principales productos de la fermentación de aminoácidos y de otras moléculas hidrogenadas son ácidos grasos de cadena corta, succínicos, aminovalérico y H<sub>2</sub>. La

fermentación de aminoácidos se considera un proceso rápido y que, en general, no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos.

Las bacterias proteolíticas que mayoritariamente se han identificado, pertenecen al género *Clostridium*, aunque otras especies tales como *Peptococcus* y *Bacteroides* también están presentes.

Los productos finales de la oxidación son NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> y un ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido oxidado (n-butírico y ácido isobutírico, isovalérico, caproico, sulfuro de hidrógeno, metilcaptano, cadaverina, putrescina, etc, según el aminoácido del que proceda)

### C. Etapa Acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles como valerato, butirato, propionato, etc y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, acetato y H<sub>2</sub>, a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Desde el punto de vista termodinámico, estas reacciones no son posibles porque en condiciones estándar (pH=7, T=25°C, P=1 atm), presentan energías libres de reacción positivas, tal y como se muestra en la Tabla 1.2.

Reacciones acetogénicas	$\Delta G^\circ$ (KJ)
<b>Etanol y láctico</b>	
$Etanol + H_2O \rightarrow Acetato + H^+ + 2 H_2$	+ 9.6
$Lactato^{-1} + 2H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + H^+ + 2 H_2 + HCO_3^-$	-4.2
<b>Ácidos Grasos</b>	
$Acetato^{-1} + 4H_2O \rightarrow H^+ + 4H_2 + 2 HCO_3^-$	+ 104.6
$Propionato^{-1} + 3H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$	+ 76.1
$Butirato^{-1} + 2H_2O \rightarrow 2Acetato^{-1} + H^+ + 2H_2$	+ 48.1
$Valerato^{-1} + 3H_2O \rightarrow 3Acetato^{-1} + 2H^+ + 4H_2$	+96.2
<b>Aminoácidos</b>	
$Alanina + 3H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + HCO_3^- + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	+ 7.5
$Aspartato^{-1} + 4H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + 2HCO_3^- + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	+ 14.0
$Leucina + 3H_2O \rightarrow Isovalerato^{-1} + HCO_3^- + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	+ 4.2
$Glutamato^{-1} + 4H_2O \rightarrow propionato^{-1} + 2HCO_3^- + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	- 5.8
$Glutamato^{-1} + 7H_2O \rightarrow acetato^{-1} + 3HCO_3^- + NH_4^+ + 3H^+ + 5H_2$	+ 70.3

**Tabla 1.3: Reacciones acetogénicas**

**Fuente: Metabolic Interactions Between Anaerobic in Methanogenic Environments, M. Stams 1994**

## D. Etapa Metanogénica

La metanogénesis, última etapa, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.

Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas). En la Figura se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaerobia, así como los productos intermedios generados.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas. Un ejemplo es que todos ellos poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación del metano.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen  $H_2/CO_2$  y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Las principales reacciones metanogénicas se recogen en la Tabla 1.4.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir del acetato a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el  $H_2$  como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son **Methanosarcina** y **Methanotherix**.

<b>Reacciones hidrogenotróficas</b>	
$4\text{H}_2 + \text{H}^+ + 2\text{HCO}_3^-$	$\longrightarrow \text{Acetato}^- + 4\text{H}_2\text{O}$
$4\text{H}_2 + 4\text{S}^\circ$	$\longrightarrow 4\text{HS}^- + \text{H}^+$
$4\text{H}_2 + 2\text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	$\longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
$4\text{H}_2 + 4\text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$	$\longrightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$
$4\text{H}_2 + 4\text{fumarato}$	$\longrightarrow 4\text{succinato}$
$4\text{H}_2 + \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+$	$\longrightarrow \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$
<b>Interconversiones formiato-hidrógeno</b>	
$\text{H}_2 + \text{HCO}_3^-$	$\longrightarrow \text{Formiato}^- + \text{H}_2\text{O}$
<b>Metanogénesis acetoclástica</b>	
$\text{Acetato}^- + \text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow 4\text{CO}_3^- + \text{CH}_4$
<b>Metanogénesis a partir de otros sustratos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fórmico</li> </ul>	
$4\text{HCOOH}$	$\longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dióxido de carbono</li> </ul>	
$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	$\longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metanol</li> </ul>	
$4\text{CH}_3\text{OH}$	$\longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trimetil-amina</li> </ul>	
$4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2$	$\longrightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimetil-amina</li> </ul>	
$2(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monometil-amina</li> </ul>	
$4(\text{CH}_3)\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$

Tabla 1.4 “Principales reacciones metanogénicas (Stams 1994; Ferguson et al., 1987)  
Fuente: Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Florida, USA 2006

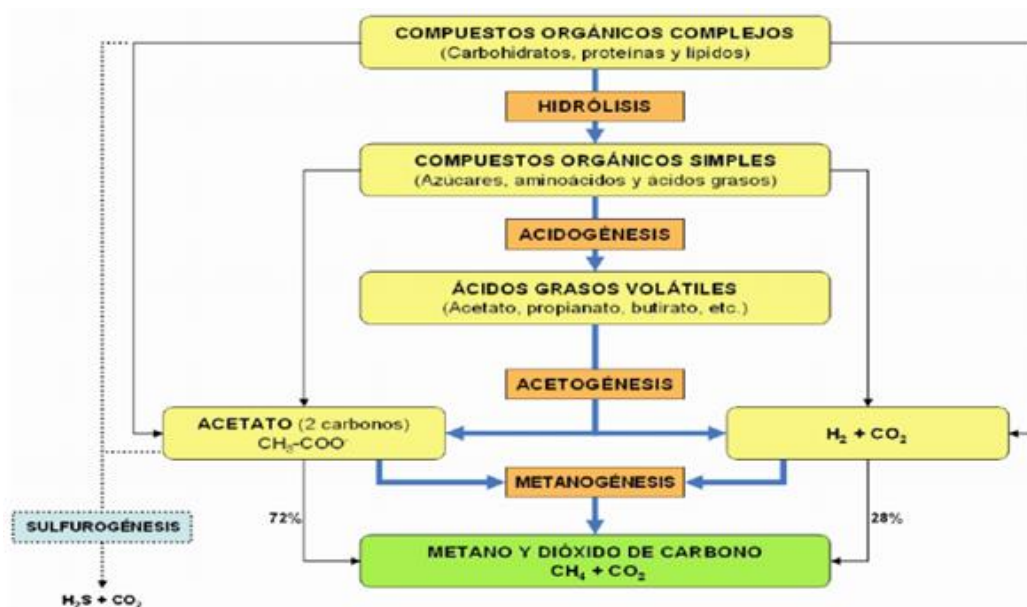


Figura 1.9: Esquema de reacciones de digestión anaerobia.  
Fuente: Adaptado de Pavlostathis, S.G. & Giraldo-Gómez, E. 1991

La principal vía de producción de metano es la correspondiente a la transformación del ácido acético, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye

la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica. Como se observa, el metano no es el único gas que se produce en la degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias, se trata de una mezcla de gases conocida como biogás. Está compuesto por un 60% de metano (CH<sub>4</sub>), un 38% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) aproximadamente y trazas de otros gases (Tabla 1.5). La composición o riqueza del biogás depende del sustrato digerido y del funcionamiento del proceso.

Compuesto	Concentración
Metano (CH <sub>4</sub> ) (%)	50 - 70
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) (%)	30 - 50
Hidrogeno (H <sub>2</sub> ) (%)	1- 10
Nitrógeno (N <sub>2</sub> ) (%)	< 3
Oxígeno (O <sub>2</sub> ) (%)	< 0.1
Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S) (ppm)	0 – 8000

**Tabla 1.5: Composición del Biogas**  
**Folleto AgroWaste Digestión anaeróbica 2014**

## 1.6 Poder Calorífico Teórico

En base a los estudios e investigaciones realizados por parte del equipo de tesis, se obtuvo la tabla 1.4, la cual nos muestra los valores del poder calorífico por cada uno de los materiales investigados, todo esto con el fin de poder contar con una referencia de los arreglos de biomasa que pueden resultar factibles como combustible para la caldera.

La tabla 1.6 considera valores en ellas de la cantidad de calor que entrega un kilogramo de combustible al oxidarse en forma completa. Esto con la intención de tener parámetros de comparación y proporcionar información para poder tener el criterio de evaluar como cada material puede usar como combustible.

Teniendo en consideración cada uno de los ejemplos que se han colocado, para de esta manera poder ponderar la utilización de materiales alternativos, los cuales no tienen un impacto considerable en el medio ambiente para su obtención. Como por ejemplo los derivados de los árboles, ya que para obtener hay que promover la tala de árboles y de esta manera tener un impacto negativo en el medio ambiente.

Y así de esta manera poder tener suficiente información para construir el criterio que ayude a considerar materiales alternativos como materia prima para biomasa.

<b>Categoría de Desechos Solidos</b>	<b>Poder Calorífico Inferior Kcal/kg</b>	<b>Poder Calorífico Inferior BTU/lb</b>	<b>Fuente</b>
Residuos de Comida	2000	3598	<a href="http://seminariodepolimeros.blogspot.com">seminariodepolimeros.blogspot.com</a>
Papel y Cartón	4000	7196	<a href="http://seminariodepolimeros.blogspot.com">seminariodepolimeros.blogspot.com</a>
Plásticos	7200	12953	<a href="http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html">www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html</a>
Vidrio	0	0	<a href="http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html">www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html</a>
Textiles	4000	7196	<a href="http://seminariodepolimeros.blogspot.com">seminariodepolimeros.blogspot.com</a>
Madera	5000	8995	<a href="http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html">www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html</a>
Maleza y Derivados	2000	3598	<a href="http://seminariodepolimeros.blogspot.com">seminariodepolimeros.blogspot.com</a>
Metales	0	0	<a href="http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html">www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html</a>
Llantas y Hule	6500	11694	<a href="http://seminariodepolimeros.blogspot.com">seminariodepolimeros.blogspot.com</a>
Poliestireno (Durapax)	11000	19789	<a href="http://seminariodepolimeros.blogspot.com">seminariodepolimeros.blogspot.com</a>
Inerte	0	0	

**Tabla 1.6: “Poder calorífico teórico biomasa”**  
**Fuente: Elaboración propia, a partir de investigación bibliográfica.**

## Capítulo 2

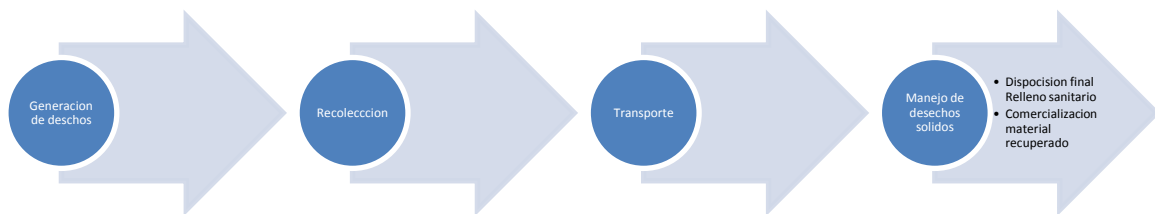
### Caracterización de los desechos sólidos recibidos y dispuestos en el Relleno Sanitario MIDES

#### 2.1 Proceso de manejo de los Desechos Sólidos, desde su generación hacia Planta de Transferencia.

Para tener una mejor idea acerca del proceso de manejo de los desechos sólidos, es necesario conocer y comprender el ciclo de los desechos sólidos.

El ciclo de los desechos sólidos es tal como se presenta en el diagrama siguiente:

**La generación** de los desechos en nuestro caso de estudio corresponde a los hogares e industrias, que se encuentran ubicadas en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Este tipo de generadores tiene la característica de producir desechos comunes.



**La recolección** corresponde al servicio brindado por las alcaldías, mediante el cual los desechos sólidos son retirados de los diferentes generadores ubicados en las rutas que cada camión tiene asignadas. En este punto también existe la modalidad de privados contratados por la industria para que retire los desechos de sus instalaciones ya que por la cantidad que estos generan la alcaldía no les brinda dicho servicio.

**El transporte** corresponde al traslado de los desechos sólidos que se han recolectado, los cuales pueden ser transportados a los lugares siguientes:

- Puntos de transferencia.
- Lugares de separación.
- Plantas de compostaje.

**Manejo de los desechos sólidos** que son transportados, está constituido por dos procesos:

**La separación (Comercialización)** actualmente en nuestro país no se encuentra legislada y tampoco existe una cultura de la separación en la generación. Pero sí existe separación en la recolección y el transporte; la cual es realizada por particulares y por las personas que integran las diferentes cuadrillas que se encargan del transporte de los desechos sólidos.

**La disposición** de los desechos se realiza en rellenos sanitarios, los cuales cuentan con todos los permisos requeridos por parte de las instituciones que tiene injerencia. En este estudio nos enfocaremos en el Relleno Sanitario MIDES.

## **2.2 Proceso de Recepción y Disposición de los Desechos Sólidos en Relleno Sanitario MIDES.**

Los desechos son recibidos en el Relleno Sanitario MIDES en báscula, donde se verifica de manera aleatoria el tipo de desechos sólidos que transporta el camión recolector, con el fin de identificar si estos necesitan algún tratamiento previo para poder ser dispuesto o corresponden a desechos comunes.

En báscula se registra el peso de los desechos sólidos que se están recepcionando, generando un ticket el cual sirve para registrar el proceso y poder realizar los procesos internos correspondientes.

Luego de su paso por báscula, el camión recolector se dirige al punto de descarga activo, es decir; el punto donde el operador del relleno ha determinado que se recepcionarán los desechos sólidos.

En el punto de descarga se encuentran ubicados el personal encargado de procesar los desechos y la maquinaria necesaria para su disposición final. Este subproceso comprende los siguientes pasos:

- Ubicación del camión en un puesto para que este pueda descargar, esta ubicación es coordinada por personal del relleno sanitario.
- Descarga del camión.
- Playado de los desechos con un tractor.
- Compactación de los desechos por un compactador pata de cabra.
- Recubrimiento de los desechos con material inerte, el cual en el caso del relleno sanitario MIDES es arcilla. Esta es extraída de su banco de préstamo.

A continuación, se enlista los desechos que son recepcionados y cuáles no, según la clasificación de MIDES:

Los desechos aceptables en el RS son los siguientes:

- Desechos sólidos (basura doméstica, escombros de construcción).
- Residuos sólidos no peligrosos provenientes de fábricas de pulpa y papel y de aserraderos.
- Desechos biomédicos tratados mediante procesos de desinfección.
- Desperdicios de alimentos
- Yesos y otras sustancias sólidas rechazadas.
- Neumáticos sin triturar (volumen diario de < 1% del volumen diario).

Los desechos no aceptables son los siguientes:

- Desechos biomédicos sin desinfectar.

- Desechos químicos.
- Chasis de vehículos automotores.
- Tierra u otro material absorbente, saturado de hidrocarburo u otros productos.
- Desechos radioactivos.
- Pesticidas.
- Desechos minerales.
- Desechos peligrosos (VIII del convenio de Basilea).

En la siguiente imagen, se presenta el ciclo de recepción y disposición de los desechos sólidos de una forma gráfica, para una mejor comprensión del mismo:



### 2.3 Promedio de Desechos Sólidos Ingresado en Relleno Sanitario MIDES

Durante el año 2015, MIDES S.E.M. DE C.V. proporcionó el servicio de disposición final a los desechos sólidos de diversas municipalidades; entre las alcaldías a las que se les brinda el servicio de disposición de los desechos sólidos generados se pueden mencionar: San Salvador, Soyapango, Santa Tecla, Mejicanos, Apopa, Ilopango, Ciudad Delgado, San Martín, San Marcos, Tonacatepeque, Cuscatancingo, Ayutuxtepeque, Nejapa, Chalatenango, Ciudad Arce, Ahuachapán, El Paisnal, San José Guayabal, San Bartolomé Perulapía, San Pedro Perulapán, Turín, Huizucar, San Francisco Chinameca, Santiago de la Frontera, San Emigdio, San Juan Tepezontes, El Rosario, Oratorio de Concepción, Monte San Juan, San Cristóbal, San Sebastián, Santo Domingo, San Esteban Catarina, Verapaz, Santa Clara, Tepetitán, San Lorenzo, San Cayetano Istepeque, Jerusalén, Mercedes La Ceiba, La Palma, San Rafael, Citalá, Victoria, Guacotecti, Nuevo Edén, Cojutepeque, San

Vicente, Quezaltepeque, Ilobasco, Aguilares, Sensuntepeque, Nueva Concepción, Guazapa, Santa Cruz Michapa, San Pablo Tacachico, Apastepeque, Guadalupe, Santa Rita, Dulce Nombre de María, San Isidro, San Ignacio, San Matías, Dolores, Comalapa, La Laguna, El Carmen, Ojos de Agua, San Gerardo, San Fernando, San Rafael Cedros, San Ant. de la Cruz, etc. Así mismo una importante cantidad de Desechos Sólidos Comunes y Especiales provenientes de empresas privadas e instituciones gubernamentales fueron también dispuestos dentro de las instalaciones del Relleno Sanitario.

Un total de 691,221.47 Tm de Desechos Sólidos, fueron recibidos y dispuestos en el Relleno Sanitario de MIDES S.E.M. DE C.V. durante el año de operaciones 2015. Dicha cantidad de Desechos Sólidos dispuestos, permite generar la siguiente tabla de promedios de ingreso de Desechos Sólidos al Relleno Sanitario de MIDES.

Tm/Día	Tm/Semana	Tm/Mes
1,893.76	13,256.30	57,601.79

#### **2.4 Identificación Experimental y Teórica del Poder Calorífico de los Desechos Sólidos Recibidos en Relleno Sanitario MIDES.**

En este apartado se explican las actividades llevadas a cabo para determinar la composición de los Desechos Sólidos recibidos en el Relleno Sanitario MIDES, comenzando con el proceso del muestreo que comprende la definición de las categorías, metodología y criterios utilizados para el muestreo, selección de la muestra, duración del muestreo, los resultados del proceso de muestreo y el cálculo del poder calorífico a partir de los datos teóricos investigados.

- **Proceso del Muestreo:**

El proceso de Muestreo para determinar la Composición de los Desechos Sólidos en términos generales comprendió lo siguiente:

- Delimitación de un área en el Punto de Transferencia Lourdes.
- En dicha área se descargaron los camiones seleccionados para ser muestreados.
- Los desechos sólidos descargados fueron clasificados y separados en contenedores especiales.
- Los contenedores especiales fueron pesados para determinar la composición de los desechos sólidos.

Para el muestreo, se definieron diez diferentes categorías en las cuales los desechos sólidos serían separados, dichas categorías son:

- |                  |                      |
|------------------|----------------------|
| - Comida         | - Metales            |
| - Papel y Cartón | - Maleza y Derivados |
| - Plástico       | - Llantas y Hule     |
| - Vidrio         | - Poliestireno       |
| - Textiles       | - Inerte             |

#### ● **Metodología y Criterios Utilizados en el Proceso de Muestreo**

Para la realización del muestreo de desechos sólidos municipales en el Punto de Transferencia Lourdes, se implementó una mezcla de los métodos de Muestreo Aleatorio Estratificado Proporcional y de Cuarteo de Muestra. Dicho punto se ha elegido ya que representa un aproximado del 30% de los ingresos de desechos provenientes de puntos de transferencia hacia el relleno. Además, este punto presentaba las condiciones idóneas de seguridad física y de salud y seguridad ocupacional para poder realizar el muestro. Los puntos que se consideraron estaban ubicados en Cabañas, Chalatenango, San Vicente, Ahuachapán e Ilobasco. Todos estos puntos representan un promedio cada uno de entre 3% a 4% de los ingresos de desechos provenientes de puntos de transferencia al relleno sanitario.

**Un Muestreo Aleatorio Estratificado** es aquel en el que se divide el universo en N individuos o estratos. En este caso serán las diferentes alcaldías y clientes que descargan en el Punto de Transferencia Lourdes. Dichos estratos son caracterizados en base a un criterio determinado. Este criterio fue la cantidad promedio de desechos sólidos recibidos por mes de cada una de las alcaldías y de los otros clientes.

La asignación de cuántos elementos de muestra se han de elegir de cada uno de los estratos se hizo por medio de la técnica de **Asignación Proporcional**. En este caso el número de elementos de cada estrato fue el número de camiones a muestrear por alcaldía. La técnica antes mencionada establece que siendo n el número de individuos de la población total que forman parte de una muestra, cuando la asignación es proporcional, el tamaño de la muestra de cada estrato es proporcional al tamaño del estrato correspondiente con respecto a la población total. En base a esto, la técnica define al estrato más grande al que más incidencia tiene en el universo; mientras que el estrato más pequeño es el que menos incidencia tiene dentro del universo.

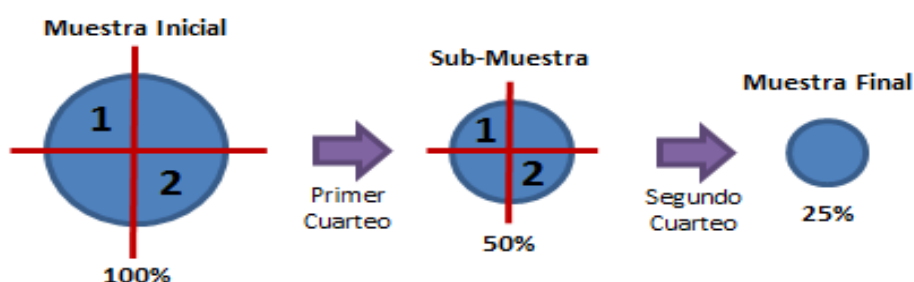
Consecuentemente, podemos asegurar que el estrato más grande será la alcaldía que más desechos sólidos descargue en el Punto de Transferencia Lourdes.

Para definir el número de camiones a muestrear, se partió de que los pepenadores serán capaces de muestrear 3 camiones por día, por lo que el número de camiones a muestrear será dado por:

$$3 \text{ camiones por día} \times 25 \text{ días de muestreo} = 75 \text{ camiones en el muestreo.}$$

Luego, estos 75 camiones fueron distribuidos entre las alcaldías y clientes siguiendo los lineamientos de la técnica de Asignación Proporcional, basándonos en el número de camiones de desechos sólidos recibidos en el Punto de Transferencia Lourdes. Dicho valor se obtiene multiplicando los 75 camiones por el respectivo % de Aporte para obtener el Número de Camiones a muestrear de cada cliente

El camión a muestrear es dirigido a un área determinada donde es descargado. Luego, de conformidad con el **Método de Cuarteo de Muestra**, se realiza el Primer Cuarteo, dividiendo los desechos sólidos en cuatro partes iguales y son descartadas dos de esas partes. Las dos partes seleccionadas se mezclan para ser homogeneizadas en una Sub-Muestra (equivalente al 50% de la Muestra Inicial). Después, en esta Sub-Muestra se realiza el Segundo Cuarteo, volviendo a dividirse en cuatro partes iguales y son descartadas dos de esas partes. Las dos partes seleccionadas se convierten en la Muestra Final, la cual corresponde al 25% de la carga total del camión seleccionado, a continuación, presentamos el esquema gráfico de este procedimiento:



La muestra seleccionada es clasificada, separada y pesada para determinar los componentes de los desechos sólidos. El proceso de análisis es inverso al proceso de la línea de trabajo. Es decir, si bien la definición de los camiones a muestrear viene dada por el total de desechos sólidos descargados, la distribución final de los componentes de los desechos sólidos viene dado por la separación de los mismos que se haga sobre cada uno de los camiones seleccionados. Estos métodos han sido también realizados por municipalidades en Perú, México y Argentina, los cuales fueron tomados como base para la realización del muestreo.

- **Selección de la Muestra**

El número final de camiones seleccionados a muestrear fue de 73 camiones y no 75 como se había calculado. Esto se debió a que, durante los dos primeros días del muestreo, los pepenadores estaban acostumbrándose a la metodología de trabajo, por lo que durante dichos días su rendimiento fue menor del establecido previamente, muestreando sólo dos camiones diarios en lugar de los tres que se muestrearon durante el resto del proceso.

Vale la pena mencionar que los clientes seleccionados para el muestreo aportan el 91.36% del total de desechos sólidos recibidos en el Punto de Transferencia Lourdes y que del 8.64% restante que no forma parte del muestreo, más del 5% es proveniente de desechos clasificados como lodo de plantas de tratamiento y cenizas provenientes de calderas. Por lo que menos del 4% de los desechos han sido excluidos del muestreo; dicho valor es muy satisfactorio y da validez a los resultados obtenidos en el muestreo.

- **Duración del Muestreo**

El Muestreo para determinar la Composición de los Desechos Sólidos en el Punto de Transferencia Lourdes fue realizado durante el periodo comprendido del 6 de Marzo al 6 de Abril de 2016, dando como resultado 25 días muestreados.

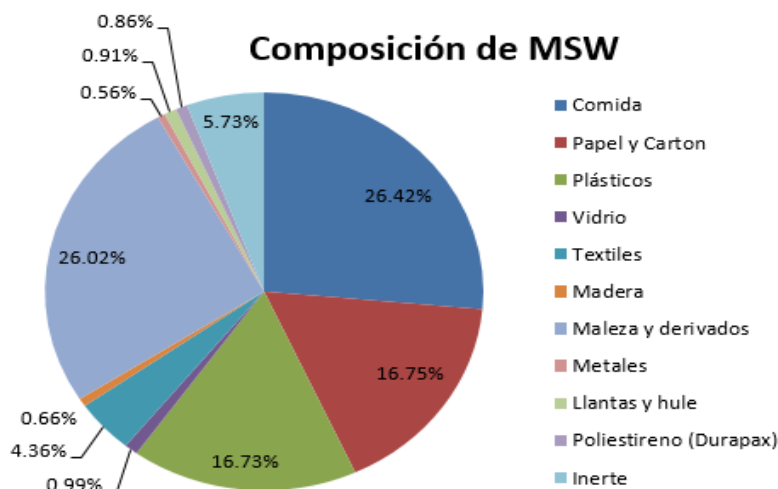
- **Resultado del Muestreo**

Durante el muestreo realizado, se pudo determinar que la composición de los MSW que llegan a MIDES presentan la siguiente distribución:

COMPONENTES	% APORTE
Comida	26.42%
Papel y Carton	16.75%
Plásticos	16.73%
Vidrio	0.99%
Textiles	4.36%
Madera	0.66%
Maleza y derivados	26.02%
Metales	0.56%
Llantas y hule	0.91%
Poliestireno (Durapax)	0.86%
Inerte	5.73%
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>

**Tabla 2.1: Porcentaje composición de desechos municipales recibidos en MIDES**

Fuente: Estudio realizado por grupo de tesis y MIDES.



**Gráfica 2.1: Porcentaje de composición de desechos municipales recibidos en MIDES**

- **Cálculos del Poder Calorífico Teórico**

A partir de la composición de los desechos sólidos recibidos en el Punto de Transferencia Lourdes, que corresponden exactamente a los recibidos en el Relleno Sanitario MIDES, se procedió a calcular el poder calorífico teórico promedio de dichos Desechos Sólidos determinando un valor de 5,909 BTU/lb, de conformidad con lo expresado en la siguiente tabla:

COMPONENTES	% DE APORTE	PODER CALORIFICO TIPICO (BTU/LB)	PODER CALORIFICO CALCULADO
Comida	26.42%	3598	951
Papel y Cartón	16.75%	7196	1,205
Plásticos	16.73%	12953	2,167
Vidrio	0.99%	0	-
Textiles	4.36%	7196	314
Madera	0.66%	8995	59
Maleza y Derivados	26.02%	3598	936
Metales	0.56%	0	-
Llantas y Hule	0.91%	11694	106
Poliestireno (Durapax)	0.86%	19789	170
Inerte	5.74%	0	-
<b>TOTALES</b>	<b>100.00%</b>		<b>5,909</b>

**Tabla 2.2: Datos teóricos calculados por el grupo de tesis, a partir de la composición de los desechos sólidos determinada en el proceso de muestreo.**

El valor expresado en la tabla anterior, corresponde a un valor ponderado del poder calorífico por tipo de desecho y su incidencia en los desechos sólidos recibidos en el Relleno Sanitario MIDES, determinado mediante el muestreo efectuado en la Planta de Transferencia Lourdes.

## 2.5 Análisis de Laboratorio para determinar el Poder Calorífico.

Como parte del proceso de muestreo realizado para determinar la composición de los desechos sólidos recibidos en el relleno sanitario MIDES, se obtuvieron dos muestras del conjunto general de desechos sólidos, ya que los desechos sólidos en su totalidad son considerados la materia prima que se utilizara para el proceso de generación, para realizar una comprobación mediante pruebas de laboratorio, del poder calorífico de los desechos que se reciben en MIDES. En ambas se efectuaron los procesos principales que se realizan en el procesamiento de los desechos, los cuales son: TRITURADO Y SECADO.

En las muestras se varió el proceso del tratamiento de los desechos sólidos, es decir que en la muestra de desechos denominada M1 primero se trituró y luego se secó y en la muestra de desechos denominada M2 se hizo el proceso a la inversa.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, sobre el poder calorífico de los desechos sólidos en su conjunto:



**CERTIFICADO DE RESULTADOS**

Número de Registro: 30 – 1013 – 1

San Salvador, 09 de Abril 2016

Industria:  
Manejo Integral de Deshechos sólidos, S.E.M. de C.V.

Presente.  
Estimados Señores:

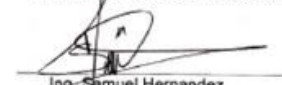
Es un placer brindarle la información sobre el resultado obtenido en el análisis realizado a las muestras proporcionadas por ustedes al laboratorio el día viernes 04 de Abril de 2016:

MUESTRA	CÓDIGO DE MUESTRA	IDENTIFICACIÓN DADA POR EL CLIENTE	CONDICIONES DE LA MUESTRA	CÓDIGO DE MUESTREO
01	75-ADI072-DS01	Desecho Sólido M1 (Triturado-Secado)	Proporcionada por el cliente	N/A
02	76-ADI073-DS02	Desecho Sólido M2 (Secado-Triturado)	Proporcionada por el cliente	N/A

**Resultados:**

MUESTRA	IDENTIFICACIÓN	ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADOS
1	Desecho Sólido M1	Humedad	N/A	10.02%
		Poder Calorífico	Adiabático	16,359 J/g 7,033 BTU/lb
		% de cenizas a 220 °C	N/A	6.75%
2	Desecho Sólido M2	Humedad	N/A	24.42%
		Poder Calorífico	Adiabático	14,134 J/g 6,077 BTU/lb
		% de cenizas a 220 °C	N/A	7.37%

Se hace constar que los resultados proporcionados en la parte superior de este documento, cumple con todos los métodos establecidos de ensayo.

  
Ing. Samuel Hernandez  
Jefe de Laboratorio



  
Ing. Tomas Alas  
Gestor de Calidad

Cualquier reclamo o consulta se atenderá en los próximos 8 días hábiles con el número de registro.  
Este informe no se puede reproducir en forma parcial, solamente en forma total.

**Figura 2.1: Certificado de análisis de arreglos de desechos clasificados MIDES**

Como puede apreciarse en los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, el orden de los pasos para procesar la muestra tiene influencia en el poder calorífico que se obtiene. Identificando claramente que el proceso aplicado en el orden de triturado y secado ayuda a obtener un mejor resultado del poder calorífico y por consiguiente mayor generación de energía eléctrica ya que en la muestra de desechos sólidos denominada M1, se obtiene un total de 7033 BTU/lb, mientras que en la muestra de desechos sólidos denominada M2, en la cual el proceso de secado se aplicó antes del triturado se obtiene un total de 6,077 BTU/lb. Vale la pena mencionar que en ambas muestras el poder calorífico obtenido es superior al poder calorífico teórico calculado a partir de la composición determinada en el proceso de muestreo de los desechos sólidos.

## 2.6 Potencial de Generación

Para poder aprovechar al máximo el potencial energético de los desechos sólidos recibidos en relleno sanitario MIDES, resulta conveniente aplicar la estrategia que se denomina “co-generación” en donde una parte de la energía de los mismos se aprovecha como energía térmica (generalmente a través de la generación de vapor para un proceso industrial o agua caliente para un proceso industrial o para calefacción de viviendas) y otra parte se convierte en energía eléctrica. En la siguiente figura, se muestran las fracciones de conversión aproximadas que pueden obtenerse en un sistema de cogeneración.

Observamos que un 50% de la energía química puede convertirse en energía térmica, un 30% en energía eléctrica y el 20% restante se pierde.

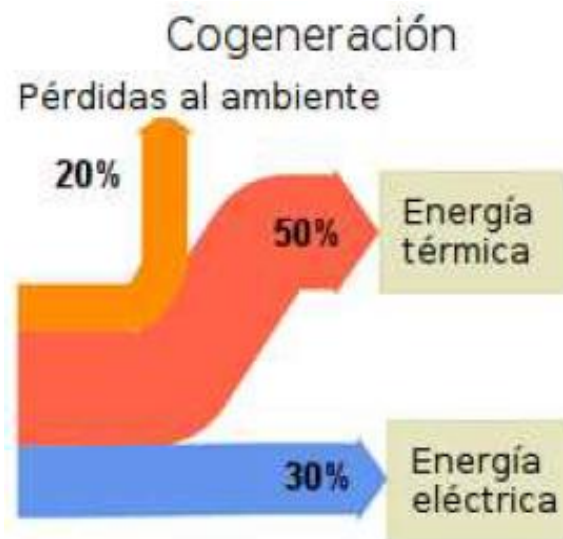


Figura 2.2: Fracciones de conversión aproximadas en un sistema de cogeneración.

Fuente: Memorias de trabajo de difusión Científica y Técnica, núm. 10 (2012) ISSN 1510-750.

## 2.7 Cálculos Teóricos de la Capacidad de Generación de Energía a partir de los Desechos Sólidos recibidos en el Relleno Sanitario de MIDES.

Para esta investigación y con el fin de presentar un mejor panorama de la factibilidad técnica para la ejecución de un proyecto que aproveche la energía contenida en la biomasa partiendo de los desechos sólidos recibidos en el relleno sanitario MIDES, como combustible alternativo para la generación de energía eléctrica, se presentan a continuación los cálculos teóricos de la capacidad de generación de energía eléctrica.

Considerando que los datos del poder calorífico de los desechos sólidos determinado tanto a nivel teórico como de las pruebas de laboratorio efectuadas a las muestras, vienen dados en BTU/lb se procede a convertir las Toneladas Métricas de desechos sólidos recibidos en el relleno sanitario MIDES por día en libras, obteniendo el siguiente resultado:

Tm /día recibidas 1,893.76 multiplicadas por 2,204.623 lb/Tm se obtienen 4,175.026.85 libras de desechos sólidos, estas libras se ponderan con el porcentaje de incidencia de cada categoría de desechos sólidos, se multiplica el valor obtenido por su poder calorífico, para obtener el total de energía térmica expresada en BTU, lo cual se muestra en el siguiente cuadro:

Componentes	% de Aporte	Desechos prorratedados	Poder Calorífico BTU/lb	Energía Térmica BTU
Comida	26.42%	1,103,042.09	3598	3,968,745,456
Papel y Cartón	16.75%	699,317.00	7196	5,032,285,116
Plásticos	16.73%	698,481.99	12953	9,047,437,248
Vidrio	0.99%	41,332.77	0	-
Textiles	4.36%	182,031.17	7196	1,309,896,305
Madera	0.66%	27,555.18	8995	247,858,819
Maleza y Derivados	26.02%	1,086,341.99	3598	3,908,658,469
Metales	0.56%	23,380.15	0	-
Llantas y Hule	0.91%	37,992.74	11694	444,287,153
Poliestireno (Durapax)	0.86%	35,905.23	19789	710,528,615
Inerte	5.74%	239,646.54	0	-
<b>TOTALES</b>	<b>100.00%</b>	<b>4,175,026.85</b>		<b>24,669,697,180</b>

**Tabla 2.3: Poder calorífico por categoría de desecho (BTU)**

Con el dato de energía térmica obtenido en el cuadro anterior que asciende a 24,669,697,180 BTU se procede a calcular la energía mecánica que viene dada por la potencia de la energía eléctrica total partiendo de las toneladas métricas recibidas por día de desechos sólidos en el relleno sanitario MIDES, los resultados se presentan en el siguiente cuadro:

Energía Térmica BTU	BTU/hr	factor de Conversión	Potencia	
			Kw	MW
24,669,697,180	1,027,904,049	0.000293071	301,248.94	301.25

**Tabla 2.4: Cálculo de energía y potencia de los desechos**

Finalmente se procede a calcular el dato de la energía eléctrica a generar, a partir de la potencia determinada en el cuadro anterior, la cual viene dada por el valor de potencia multiplicado por las horas de producción de energía durante el año, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Potencia Kw	Horas de Producción	Energía Eléctrica a producir Kw/hr por año
301,249	8,760	2,638,940,710

**Tabla 2.5: Energía total a generar**

Respecto al cálculo de materiales utilizados para la generación de energía, se considera que los elementos que pueden ser reciclados o recuperados. Los que se consideran con valor comercial, pueden ser extraídos. Los materiales con valor comercial son los siguientes:

Componentes	% de Aporte	Desechos prorrateados	Poder Calorífico BTU/lb	Energía Térmica BTU
Papel y Cartón	16.75%	699,317.00	7196	5,032,285,116
Plásticos	16.73%	698,481.99	12953	9,047,437,248
Metales	0.56%	23,380.15	0	-
<b>TOTALES</b>	<b>34.04%</b>	<b>1,421,179.14</b>		<b>14,079,722,364</b>

**Tabla 2.6: Material con valor comercial**

Por consiguiente, lo que se consideró para la generación de energía eléctrica son los materiales siguientes:

Componentes	% de Aporte	Desechos prorrateados	Poder Calorífico BTU/lb	Energía Térmica BTU
Comida	26.42%	1,103,042.09	3598	3,968,745,456
Vidrio	0.99%	41,332.77	0	-
Textiles	4.36%	182,031.17	7196	1,309,896,305
Madera	0.66%	27,555.18	8995	247,858,819
Maleza y derivados	26.02%	1,086,341.99	3598	3,908,658,469
Llantas y Hule	0.91%	37,992.74	11694	444,287,153
Poliestireno (Durapax)	0.86%	35,905.23	19789	710,528,615
Inerte	5.74%	239,646.54	0	-
<b>TOTALES</b>	<b>65.96%</b>	<b>2,753,847.71</b>		<b>10,589,974,816</b>

**Tabla 2.7: Material sin valor comercial, con los cuales se generará energía eléctrica**

Con la energía térmica determinada para los desechos sólidos sin valor comercial, se procede a calcular la energía mecánica que viene dada por la potencia de la energía eléctrica total, según siguiente tabla:

Energía Térmica BTU	BTU/hr	Factor de Conversión	Potencia	
			Kw	MW
10,589,974,816	441,248,951	0.000293071	129,317.30	129.3

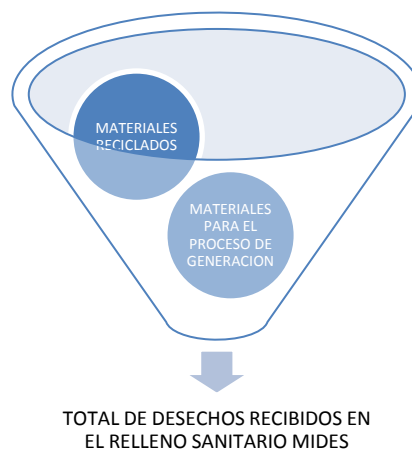
**Tabla 2.8: Energía y Potencia de los desechos sólidos sin valor comercial**

A partir de la potencia determinada en el cuadro anterior, se procede a calcular el total de energía eléctrica a generar, la cual viene dada por el valor de potencia multiplicado por las horas de producción de energía durante el año, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Potencia Kw	Horas de Producción	Energía Eléctrica a producir Kw/hr por año
129,317	8,760	1,132,819,567

**Tabla 2.9: Energía total a generar con los desechos sólidos sin valor comercial**

Se considera a continuación de manera esquemática, como están comprendidos los desechos sólidos. Tomando en consideración los materiales que tienen un valor comercial.



**Figura 2.3: Diagrama matriz de desechos clasificados por valor comercial y no comercial**

## **2.8 Análisis Comparativo de Proyectos ya Implementados en Otros Países.**

A continuación, se presenta un análisis comparativo de proyectos que aprovechan la biomasa de los desechos sólidos como combustible alternativo para la generación de energía eléctrica implementados en Latinoamérica y que ya se encuentran en ejecución, lo que permite justificar la viabilidad de implementación de proyectos similares en nuestro país:

### **Relleno Sanitario del Municipio de Salinas Victoria N.L**

La planta se inauguró en 2003 con una capacidad de 7.42 MW, con una inversión privada de 5.7 millones de dólares y un donativo del Banco Mundial de 5.1 millones de dólares, totalizando una inversión de 10.8 millones de dólares. Actualmente ha ampliado su capacidad instalada bruta de generación a 16.96 MW (neta 16.0 MW), las instalaciones del relleno sanitario cuentan con una red de captación de biogás, cuya composición es de aproximadamente 55% metano y 45% CO<sub>2</sub>, el paquete de generación cuenta con 16 motores de combustión interna de 1.06 MW marca GE Jenbacher, modelo JGC 320 GS-L.L.

### **Relleno Sanitario de San Nicolás, Aguascalientes**

Inició la operación del relleno sanitario de San Nicolás en 1998 con una primera celda para confinamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). El proyecto de generación eléctrica surgió hasta en 2009, el paquete generador consta de dos motogeneradores Caterpillar de 1.35 MW cada uno, para un total de 2.7 MW, la inversión aproximada ha sido de \$7.0 Millones de Dólares, esperando que produzcan 90,000 bonos de carbono anuales.

### **Relleno Sanitario de Ciudad Juárez, Chihuahua**

La instalación cuenta con tres unidades Caterpillar G3520C con una capacidad de 4.5 MW, comenzando operaciones el 15 de junio de 2011, a la fecha se ha realizado una inversión de 220 millones de pesos equivalentes aproximadamente a \$12.0 millones de dólares.

## **2.9 Efectos en la Matriz Energética al Implementar la Generación de Energía Eléctrica a partir de los Desechos Sólidos recibidos en el Relleno Sanitario MIDES.**

De acuerdo a la Potencia determinada a partir del total de los desechos sólidos recibidos en el relleno sanitario MIDES, la cual asciende a 301.25 MW esta representaría un 19.25% de la capacidad instalada reportada por los operadores al 31 de diciembre de 2014 y revelada en el Boletín Estadístico 16 del Sector Electricidad 2014 de la SIGET, la cual superaría la capacidad instalada de la generación geotérmica y permitiría una reducción significativa en el costo de la energía eléctrica del país.

Ahora bien, si se considera solo la Potencia determinada a partir de los desechos sólidos sin valor comercial recibidos en el relleno sanitario MIDES, la cual asciende a 129.3 MW esta representaría un 8.2% de la capacidad instalada reportada por los operadores al 31 de diciembre de 2014 y revelada en el Boletín Estadístico 16 del Sector Electricidad 2014 de la SIGET, la cual superaría la capacidad instalada de la planta de generación geotérmica de Berlín o la capacidad instalada en la presa hidroeléctrica 5 de Noviembre, con lo cual se efectuaría una reducción significativa en el costo de la energía eléctrica del país.

## **Capítulo 3**

### **Conclusiones**

Para poder concluir sobre la factibilidad o no del aprovechamiento de la biomasa a partir de los desechos sólidos recibidos en el Relleno Sanitario MIDES, es necesario hacer un recuento detallado de los diferentes criterios para adoptar una tecnología determinada de generación, considerando los siguientes:

Disponibilidad de los Desechos Sólidos.

Variación en el Poder Calorífico de los Desechos Sólidos.

Cumplimiento de las Normas Ambientales.

Factibilidad del Proyecto.

#### **3.1 Disponibilidad de los Desechos Sólidos**

A través de la presente investigación se ha determinado que la cantidad de desechos sólidos recibidos y depositados en el relleno sanitario MIDES asciende a 1,893.76 Toneladas Métricas diarias con un potencial de energía mecánica de 301 MW que no necesariamente se tendría que explotar en su totalidad, por lo tanto, se cuenta con suficiente disponibilidad de recursos o combustible alternativo para la generación de energía eléctrica, cuyo costo prácticamente es cero.

#### **3.2 Variación en el Poder Calorífico de los Desechos Sólidos**

De conformidad con el muestreo realizado en la Planta de Transferencia Lourdes para determinar la composición de los desechos sólidos recibidos en el relleno sanitario MIDES, se ha obtenido un poder calorífico teórico de 5,909 BTU/lb, lo cual fue validado mediante análisis de laboratorio que determinaron un poder calorífico de 6,077 BTU/lb y 7,033 BTU/lb a dos muestras tomadas del conjunto total de los desechos sólidos, con lo que se puede afirmar que el poder calorífico de los desechos sólidos que servirán de combustible para la generación de energía eléctrica no son tan variables unos respecto de los otros y tienen el poder calorífico necesario para la generación de energía eléctrica.

#### **3.3 Cumplimiento de las Normas Ambientales**

La generación de energía eléctrica a partir de Biomasa, es una forma de producción de electricidad de bajo costo operativo, sus costos variables son los de operación y mantenimiento, ya que no tiene costo de combustible y es amigable con el medio ambiente porque contribuye al manejo adecuado de los desechos sólidos y prolongaría la vida útil del relleno sanitario, donde se confinan los desechos sólidos del gran San Salvador.

### **3.4 Factibilidad del proyecto**

Podemos concluir de acuerdo a la investigación realizada, que este proyecto es una opción viable para generar energía eléctrica que contribuye además al manejo adecuado de los desechos sólidos reduciendo la contaminación, este tipo de inversiones se están viendo en municipalidades de ciudades europeas y en nuestro país un proyecto de esta índole sería atractivo siempre y cuando se tenga apoyo económico con la perspectiva medioambientalista. Es de considerar también que los desechos sólidos son demasiado valiosos en términos energéticos, como para disponerlos en un relleno sanitario, pudiendo ser aprovechados como una fuente de energía, mediante procesos de gasificación con recuperación energética la cual se podría convertir en la principal forma de valorización de los desechos sólidos.

## Bibliografía

- Kinetics of Anaerobic Treatment: A Critical Review, S.G. Pavlostathis & E. Giraldo- Gómez, E. Año 1991.
- Anaerobic biotechnology for Industrial Wastewater Treatment, RE. Speece, 1983.
- Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Florida, USA 2006.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Metabolic Interactions Between Anaerobic Bacteria in Methanogenic Environment, M. Stams, 1994.
- Folleto AgroWaste Digestión Anaeróbica, 2014.
- Memorias de Trabajo de Difusión Científica y Técnica, núm. 10 (2012) ISSN 1510-750.
- Plan Maestro para el Desarrollo de Energías Renovables en El Salvador, CNE.
- Política Energética de El Salvador, 2010 – 2024.
- Unidad de Transacciones de El Salvador, 2014
- Teoría general de biomasa, Dr. Eduardo Badia
- Modelación de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de Lecho Fijo, Universidad Nacional de Colombia, 2011
- Instituto de investigaciones eléctricas de México, Primera edición: octubre de 2012
- WASTE TO ENERGY. A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices, Preparado por Stantec Consulting for Environmental Quality Branch. Marzo 2011.
- Seminario de Polimeros.[blogs.blogspot.com/p/pct/\\_como\\_combustible.html](http://blogs.blogspot.com/p/pct/_como_combustible.html)
- <http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.11r.html>
- Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales. MARN/BID 1209/OC-ES, Elaborado por EcoTrans, S.A. de C.V. San Salvador, Diciembre de 2006.